

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Sampah merupakan bahan hasil aktivitas manusia sehari-hari yang berasal dari rumah tangga, pasar, perkantoran, tempat umum, pusat industri, maupun proses alam yang belum memiliki nilai ekonomis yang dibuang ke lingkungan. Upaya untuk mengelola sampah dengan membuang ke tempat pembuangan akhir (TPA) dimaksimalkan agar sampah tidak lagi berada di sekitar kita (Damanhuri, 2008). TPA didefinisikan sebagai fasilitas fisik yang digunakan untuk membuang sampah pada permukaan tanah. Rekayasa pengelolaan sampah secara *sanitary landfill* ditujukan untuk mencegah lindi agar tidak mencemari air tanah, sehingga diperlukan pemasangan saluran penampung lindi untuk membuang lindi ke tempat pengolahan (Tchobanoglous *et al.*, 1993).

Proses dekomposisi sampah yang berlangsung di dalam TPA disebabkan oleh aktivitas mikroorganisme yang secara umum melalui fase *aerobik*, *fakultatif*, dan *anaerobik*. Proses penguraian bahan organik tersebut dapat menjadi bahan gas-gas NH_3 , H_2S , CH_4 , dan CO_2 . Sebagai produk lain pengoperasian TPA, lindi (*leachate*) merupakan limbah cair yang timbul akibat masuknya air eksternal ke dalam timbunan sampah, melarutkan, dan membilas materi-materi terlarut, termasuk materi organik hasil dari proses dekomposisi secara biologis. Kuantitas lindi yang dihasilkan akan banyak bergantung pada masuknya air dari luar, yang sebagian besar berasal dari air hujan. Selain itu, aspek operasional yang diterapkan berupa aplikasi tanah penutup, kemiringan (*slope*) permukaan, dan kondisi iklim (Damanhuri, 2008).

Limpasan limbah lindi dari TPA banyak menyebabkan permasalahan lingkungan, sehingga kasus ini sering terjadi. Dampak negatif yang ditimbulkan misalnya bakteri pathogen yang berasal dari sampah, dapat menyebabkan penyakit Infeksi Saluran Pernapasan Atas (ISPA), penyakit kulit, dan gastritis (Dinkes Kota Bekasi, 2000). Kasus yang terjadi di TPA Putri Cempo Surakarta mengandung jumlah *E. coli* di atas baku mutu (Kusumawati, 2012). Kematian pada biota air yang disebabkan oleh adanya zat beracun di dalam lindi. Selain itu, kematian ikan dan bakteri juga dapat menyebabkan kerusakan pada tanaman dan tumbuhan air yang disebabkan oleh limbah lindi (Sugiharto, 1987). Gangguan terhadap keindahan dan kenyamanan seperti bau H₂S dari proses pembusukan bahan organik secara *anaerobik*, warna, dan rasa yang juga disebabkan oleh bahan organik dari limbah lindi (Effendi, 2003).

Salah satu contoh kasus limpasan lindi di antaranya adanya keluhan masyarakat yang tinggal di sekitar bantaran Gebang DKI Jakarta TPA seluas 108 hektar yang dapat menurunkan kualitas air sumur (Setyaningrum, 2002). Kasus tercemarnya air tanah dan badan air disebabkan oleh lindi (Kusumawati, 2012). Hasil penelitian air tanah di Desa Sulurejo dan Randusari pada jarak 50—300 M dari TPA Putri Cempo Surakarta sudah tercemar lindi dan airnya tidak layak dikonsumsi sebagai air minum, karena kandungan TDS 71,0—76,0 mg/L, BOD 4,06—48,54 mg/L, COD 13,03—86,79 mg/L. TPA Galuga Bogor kandungan BOD 4.500—13.000 mg/l, COD antara 11.000—22.000 mg/l, TSS antara 550—2.000 mg/l. TDS 11.000—14.450 mg/l (Widyatmoko dan Moerdjoko, 2002). Menurut Friedman (2000) yang menganalisis kandungan lindi TPA, COD sebesar 150—100.000 mg/l serta BOD (200—2.000) mg/L. Rasio BOD/COD cukup rendah (0,05—0,2) pada tahap pematangan (Tchobanoglous *et al.*, 1993). Hasil penelitian karakteristik limbah lindi yang dilakukan oleh Warmadewanthi dan Slamet (2008) menunjukkan bahwa limbah lindi TPA Benowo Surabaya

memiliki kandungan BOD sebesar 2.100 mg/l dan COD 4.300 mg/l. Menurut Damanhuri (2008) menganalisis kandungan limbah lindi TPA di Jakarta di mana COD 413—6.839 mg/L. TPA Leuwigajah di kota Bandung COD 7379—58.661 mg/L, NH_4 738—1.356 mg/L. TPA Bogor memiliki kandungan COD 4.303—28.723 mg/L.

Pencemaran lingkungan adalah perubahan lingkungan yang tidak menguntungkan, sebagian karena tindakan manusia, disebabkan oleh perubahan pola penggunaan energi dan materi, tingkatan radiasi, bahan-bahan fisik dan kimia, dan jumlah organisme. Perbuatan ini dapat mempengaruhi langsung manusia, atau tidak langsung melalui air, hasil pertanian, peternakan, benda-benda, perilaku dalam apresiasi dan rekreasi di alam bebas (Sastrawijaya, 2000). Polutan yang terbangun ke lingkungan namun tidak diolah terlebih dahulu, atau diolah tetapi masih di atas baku mutu limbah yang telah ditetapkan akan berdampak negatif. Berkaitan dengan permasalahan di depan, Undang-Undang Republik Indonesia nomor 32 tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup pasal 1 ayat 14 telah mengatakan pencemaran lingkungan adalah masuk atau dimasukkannya makhluk hidup, zat, energi dan/atau komponen lain ke dalam lingkungan hidup oleh kegiatan manusia, sehingga melampaui baku mutu lingkungan hidup yang telah ditetapkan.

Isu urgensinya dilakukan penelitian ini mengingat dampak negatif dari kandungan bahan pencemar dari limbah lindi seperti yang terjadi di TPS Raya Terboyo kecamatan Genuk kota Semarang. Hasil penelitian pendahuluan berturut-turut menunjukkan TSS 240—340 mg/L, TDS 3260—4.630 mg/l, DO 5,01—5,83 mg/L, BOD 65,51—182,43 mg/L, COD 479,50—605,34 mg/L, dan Pb 0,074—2,975 mg/L. Analisis kandungan limbah lindi di TPS Terboyo sangat tinggi, maka perlu adanya pengurangan seminim mungkin dampaknya terhadap lingkungan. Kandungan DO diperlukan oleh biota untuk mendegradasi senyawa

organik di dalam air. Akan tetapi dengan tercemarnya badan air dan air tanah oleh limbah lindi, terjadi penurunan kandungan DO yang dapat mengancam proses kehidupan biota air, bahkan biota air banyak yang mati (Sugiharto, 1987).

Keberadaan BOD yang tinggi di dalam air, merupakan indikasi bahwa perairan tersebut telah tercemar oleh limbah lindi. Kandungan maksimum BOD yang diperkenankan untuk kepentingan air minum dan menopang kehidupan organisme akuatik sebesar 3,0—6,0 mg/L. Konsentrasi COD tinggi tidak diinginkan untuk kepentingan perikanan dan pertanian. Nilai COD pada perairan yang tidak tercemar biasanya kurang dari 20 mg/L, sedangkan pada perairan tercemar dapat lebih dari 200 mg/L dan pada limbah industri dapat mencapai 60.000 mg/L (APHA-AWWA, 1998). Logam berat Pb yang terlalu tinggi di dalam tanah mempunyai efek berkurangnya mikroorganisme, sehingga berpengaruh pada kualitas tanah dan produktifitas primer. Kandungan logam berat dan *nutrisi mikro* di dalam tanaman harus di bawah ambang batas, agar tidak beracun bagi makhluk lainnya. Menurut PPRI nomor 82 tahun 2001, kandungan Pb di dalam perairan golongan IV maksimum dianjurkan di dalam 0,1 ppm dan minimum 0,03 ppm untuk golongan I—III.

Berdasarkan pertimbangan parameter secara fisik dan kimia mengenai kandungan limbah lindi yang sangat banyak serta isu-isu permasalahan yang disampaikan di atas, maka ruang lingkup penelitian ini dibatasi pada kajian bahan pencemar limbah lindi yang meliputi kandungan BOD, COD, TDS, dan logam berat Pb. Di mana unsur-unsur tersebut yang telah mencemari lahan basah terdapat di kawasan Terboyo kecamatan Genuk kota Semarang. Kondisi karakteristik limbah lindinya cenderung memiliki jumlah kandungan organik sangat tinggi, sehingga apabila limbah lindi tersebut dibuang langsung ke lingkungan dapat mencemari badan air dan air tanah.

Dampak negatif limbah lindi terhadap perairan di alam dapat dikurangi kandungan lindinya dengan menggunakan pengolahan konvensional hingga yang lebih modern. Namun rekayasa teknologi tersebut akan membutuhkan biaya konstruksi dan operasi yang sangat tinggi. Umumnya kandungan pencemar dalam lindi yang cukup tinggi seperti lindi di Indonesia belum bisa mencapai konsentrasi *effluen* yang diinginkan bila hanya dengan satu kali tahap pengolahan, sehingga perlu pengolahan lanjutan sebagai tahap akhir pengolahan untuk lindi dengan menggunakan sistem lahan basah alami (*wetland*) atau buatan.

Terminologi lahan basah (*wetland*) sangat beragam. Menurut Campbell and Odgen (1999), *wetland* adalah area yang setidaknya tergenangi air secara *intermittent*. Pengertian lainnya menyebutkan lahan basah sebagai suatu lahan yang jenuh air dengan kedalaman air tipikal kurang dari 0,6 meter yang mendukung pertumbuhan tanaman air *emergent* misalnya *Cattail*, *bulrush*, *umbrella plant*, dan *sedge* (Metcalf and Edy, 1993). Kata *wetlands* berasal dari bahasa Inggris yang berarti lahan basah. Menurut buku *Conservation Technology Information* (CTI, 2007) dijelaskan bahwa *wetlands* merupakan areal transisi antara lahan kering dengan wilayah perairan seperti danau, rawa, paya, sungai, dan pantai. Tidak semua lahan basah selalu berair atau tergenang sepanjang tahun.

Lahan basah telah mengalami perkembangan. Lahan basah alami maupun CWs berisi bermacam-macam tumbuhan dan bakteri yang sangat efektif untuk menurunkan konsentrasi polutan, yang meliputi dekomposisi dan *immobilisasi* bahan yang toksik. Novotny and Olem (1994) mengatakan CWs merupakan pengolahan limbah secara alami yang disusun dari tiga faktor utama, yakni area yang digenangi air dan mendukung hidupnya *aquatic plant* jenis *hydrophita*, media berupa tanah/pasir yang selalu digenangi air, dan media jenuh air. Menurut Higgins (2000), ada tiga cara yang dapat digunakan untuk mengolah lindi sebelum dibuang ke

badan air yaitu dengan memproses lindi secara fisik, kimia dan biologis. Selain itu, kandungan organik dan nutrien cukup tinggi memerlukan penanganan yang bersifat *integratif* dengan pendekatan pemanfaatan (Mangkoediharjo, 2002).

Hasil penelitian Lin *and* Shu (2003) menunjukkan bahwa mengkaji sistem CWs dapat menurunkan kandungan COD antara 33—77 %. Selanjutnya, hasil penelitian Heaely *et al.* (2000) menyebutkan sistem CWs dapat menurunkan N total 80 % dari limbah lindi. Selain itu, dalam penelitian sejenis sistem CWs juga dapat menyisihkan N total sebesar 100 % (Jayaweera *and* Kasturiarachi, 2004).

Kelebihan pengolahan dengan menggunakan lahan basah yang tidak memerlukan biaya tinggi dalam operasional dan pemeliharaannya berlangsung secara alamiah, sehingga dapat menjadi solusi untuk kendala biaya, teknis, dan operasional sistem pengolahan secara konvensional. CWs adalah teknologi pengolahan inovatif untuk lindi. Lahan basah terdiri dari air, tanah, dan tanaman lahan basah (Li, 2009). Realitanya, penerapan yang dilakukan secara normal pada CWs adalah perkembangan teknologi pengolahan lindi yang terjadi di negara berkembang. Sistem ini belum digunakan secara luas, karena kurangnya kesadaran, dan keahlian lokal dalam mengembangkan teknologi secara lokal (Denny, 1997; Haberl *and* Langergraber, 2000; Kivaisi, 2000; Belmont *et al.*, 2004). Sistem ini cukup menguntungkan karena mampu mengubah lindi menjadi biomassa tanaman, yang memberikan manfaat lebih lanjut. Kelebihan sistem pengolahan air limbah dengan memanfaatkan tanaman mampu meningkatkan rasio BOD/COD sebagai ukuran tingkat *biodegradability* limbah (Mangkoediharjo, 2002).

Beberapa negara yang telah menerapkan sistem lahan basah aliran horisontal (HFCWs) dirilis oleh Vymazal (2008) yakni Canada, Norway, Polandia, Slovenia, United Kingdom, dan

USA. Beberapa wilayah di Indonesia yaitu lahan basah buatan yang ada di Pondok Pesantren Arrafah Cililin Bandung, pengolahan limbah MCK yang ada di Petojo Utara Jakarta, dan CWs dalam skala kecil untuk Kolong di Bangka (Fachmijany *et al.*, 2010). IPAL Tlogomas Malang yang mengolah air limbah domestik juga menggunakan lahan basah buatan dengan memanfaatkan tanaman *cattail* dan *C.alternifolius* (Prasetyaningtyas, 2003).

Menurut Polprasert (1996) menyatakan, bahwa tanaman air yang sering digunakan penelitian adalah *cattail* (*Typha latifolia*), eceng gondok (*Eichornia crassipes*), *duckweed* (*Lemna minor*), akar wangi (*Vetiveria zizanioides*). Tanaman *Cyperus alternifolius* merupakan tanaman hias yang mudah didapatkan. Liao *et al.* (2003) menganalisis tanaman *Cyperus alternifolius* dapat menurunkan kandungan BOD 64 % dan COD di level 68 %. Sistem CWs aliran permukaan dalam aplikasinya tidak memerlukan lahan luas, selain itu limbah lindi berada di bawah permukaan media, sehingga tidak timbul genangan dan dapat mengurangi gangguan bau serta bersarangnya nyamuk.

Jarchow and Cook (2009) mengatakan *Typha angustifolia* L merupakan tanaman eksotis invasif di Amerika Utara yang sering membentuk monokultur di lahan basah. Tanaman ini lebih invasif dibandingkan anggota asli dari genusnya. Sale and Wetzel (1983), Ball (1990), dan Miklovic (2000) merilis karakteristik tanaman *Typha* sp yang awalnya telah tumbuh subur di dalam sistem rawa yang telah tercemar secara berturut-turut. Zhang *et al.* (2010), merilis *Typha* sp sebagai spesies tanaman berdaun panjang dan sempit yang direkomendasikan pada kedalaman air 6 inchi, agresif, dan mampu toleran pada air payau dengan pH antara 3,7—8,5 serta tidak direkomendasikan untuk lahan basah dari air semburan karena invasifnya sangat tinggi.

Kissoon *et al.* (2011) menemukan beberapa elemen yang terakumulasi dekat akar *Rumex crispus* secara signifikan lebih besar pada tanaman yang tumbuh di lahan basah dibandingkan dengan lahan kering. Rata-rata *T.angustifolia* menghasilkan biomassa empat kali lebih banyak dan serapan unsurnya 2—27 kali lebih besar di bawah pada lahan basah dibandingkan dengan lahan kering. Sementara menurut Jingtao *et al.* (2011) merekomendasikan tanaman *T.angustifolia* dapat tumbuh secara normal pada kandungan COD kurang dari 400 mg/L dibandingkan dengan COD di atas 600—800 mg/L yang berubah menurun secara tajam tingkat pertumbuhannya. Selanjutnya penelitian yang dilakukan Belmont *et al.* (2004) menunjukkan analisis *T. angustifolia* pada lahan basah buatan aliran vertikal (*downflow*) dapat menurunkan TSS, Nitrogen, dan Ammonium dengan efisiensi lebih dari 50 %, dan lebih adaptif dengan limbah domestik. Walaupun sistem lahan basah buatan aliran vertikal (*downflow*) menggunakan media arang kayu diameter 1—5 cm dan beban hidraulik sebesar 0,05 m³/m² hari dapat menurunkan BOD 95,5—1,7 %, Nitrogen antara 92,1—2,3 %, Posfat 95,5—2,7, dan SS antara 94,5—1,6 % (Sirianuntapiboon *et al.*, 2007).

Penelitian yang dilakukan oleh Demirezen *and* Aksoy (2004) menunjukkan korelasi positif antara konsentrasi Pb dalam air dan tanaman *T. angustifolia* L. Kandungan Pb yang diakumulasi oleh tanaman pada tingkat yang lebih tinggi dalam sedimen di bawah daripada di dalam air. Daun *T.angustifolia* L kurang mengakumulasi logam berat daripada akar. Ada hubungan yang signifikan antara konsentrasi Cd dalam sampel tanaman dan nilai pH air. Selain itu, ditemukan juga adanya jaringan *T.angustifolia* mengakumulasi logam berat yang lebih besar daripada jaringan *P.pectinatus* (L.).

Penerapan sistem CWs sebagai teknologi unggulan yang bernilai ekonomis harus terus dikembangkan, dan manfaat ekonominya penting dipertimbangkan sebagai tambahan insentif

bagi masyarakat dalam pemeliharaan lahan basah buatan di negara berkembang (Belmont *et al.*, 2004). Teknologi dari VF-CWs sangat efektif dari segi biaya, manfaat lingkungan, dan siklus hidup dibandingkan dengan teknologi pengolahan konvensional. Konstruksi lahan basah telah digunakan sebagai teknologi hijau untuk mengolah berbagai air limbah selama beberapa dekade. CWs menawarkan sistem operasional energi rendah, intensif, minim operasional, dan alternatif untuk sistem pengolahan konvensional, terutama bagi masyarakat kecil dan daerah terpencil. Tetapi untuk operasional yang berkelanjutan dan keberhasilan penerapan sistem ini tetap menjadi tantangan (Haiming *et al.*, 2015). VF-CWs memiliki investasi yang rendah dan biaya operasional minim dibandingkan dengan metode konvensional lainnya dalam pengolahan air limbah dan merupakan teknologi yang ramah lingkungan untuk air limbah dan pengolahan lumpur yang menempatkan VF-CWs di antara teknologi pengolahan berkelanjutan (Stefanakis *et. al.*, 2014).

Salah satu media pasir *porous* di dalam CWs yang masih kurang dikaji perannya dalam menyisihkan dan mengakumulasi bahan organik limbah lindi adalah media pasir *porous* tersusun. Media pasir tersusun kali pertama digunakan tahun 1830 di Inggris dan dikenal dengan istilah saringan pasir lambat (SPL). Saringan pasir lambat awalnya digunakan untuk menurunkan bahan butiran halus (*koloid*) dan mengakumulasi bakteri di permukaan media saringan pasir sehingga terbentuk lapisan *biofilm*. SPL dalam kondisi ideal dapat menurunkan 98—99,5 % dari jumlah bakteri yang terdapat di dalam air baku. Fase pada saringan pasir lambat ini kemudian berlanjut pada fase pematangan sehingga banyak *microbial zoogloal* yang tumbuh dengan sendirinya di lapisan atas *filter* ini, yang dikenal istilah *schmutzdecke*. Setelah lama beroperasi, *headloss* akan meningkat, sehingga harus dilakukan pencucian media saringan pasir (Reynold and Richards, 1996).

Rekayasa penggunaan SPL di dalam sistem pengolahan air limbah telah dikembangkan di University of Girona-Spain tahun 2012. Hasil studi pengembangannya menunjukkan keefektifan media pasir untuk mengurangi kekeruhan dan meningkatkan kandungan DO dari limbah yang direklamasi pada irigasi skala mikro. Dengan menggunakan limbah yang direklamasi dengan variasi *ES* pada 0,32; 0,47; 0,63; dan 0,64 mm dapat menurunkan *turbidity* dan meningkatkan kandungan DO. Studi ini berusaha untuk menentukan periode pematangan filter, yaitu waktu setelah pencucian (*backwashing*) ketika limbah disaring memiliki kualitas terendah) dan memiliki efek *backwashing* filter terhadap efisiensi penyaringan. Efisiensi penurunan kekeruhan dicapai 59,6—85,4 % dan peningkatan DO antara 4,5—15,7 %, (Elbana *et al.*, 2012).

Siegrist *and* Boyle (1987) menemukan akumulasi bahan organik di lapisan pasir atas, sehingga pernyataan tersebut telah mengalami *humification*, yang secara bertahap mengisi ruang pori dan mengurangi *permeabilitas* media pasir (Khatiwada *and* Polprasert, 1999). Jenis media filter dan pengendapan padatan organik dan anorganik pada lapisan permukaan media telah dianggap dapat menyebabkan penutupan permukaan (*clogging*), (Platzer *and* Mauch, 1997; Rodgers *et al.*, 2004).

B. Rumusan Masalah

Kandungan bahan pencemar dari limbah *leachate* di Indonesia sampai saat ini telah menyebabkan dampak negatif yang sangat membahayakan. Dampak negatif tersebut di antaranya air tanah telah tercemar oleh limpasan limbah lindi, sehingga airnya tidak layak dikonsumsi sebagai air minum, gagal panen tambak Udang yang diakibatkan airnya tercemar oleh limbah lindi, air sumur masyarakat yang dekat TPA tidak bisa dikonsumsi karena

tercemar oleh limpasan limbah lindi dan menyebabkan kualitas air sumur mengandung bakteri *Eschericia Coli*, serta masyarakat yang tinggal di sekitar TPA rata-rata mengeluh tentang menurunnya kualitas air sumur.

Selain isu-isu yang disampaikan pada permasalahan di depan, juga terdapat isu terkini yang penting untuk dikaji lebih lanjut, yakni tercemarnya kawasan lahan basah di Kecamatan Genuk kota Semarang oleh limpasan limbah lindi dari TPS sampah dengan; TSS 240—340 mg/L, TDS 3.260—4.630) mg/l, DO 5,01—5,83 mg/L, BOD 65,51—182,43 mg/L, COD 479,50—605,34 mg/L, dan Pb 0,074—2,975 mg/L. Setelah dikaji indikator kandungan bahan pencemar tersebut telah mengalami kondisi cemar sesuai dengan baku mutu limbah dalam PPRI nomor 82 tahun 2001.

Beberapa penelitian sebelumnya yang terkait dengan penelitian ini secara spesifik mengkaji tentang pengaruh waktu penahanan hidraulik (HDT) yang bervariasi dalam HF-CWs terhadap penurunan kandungan organik limbah lindi. Penelitian tersebut dilakukan oleh Stefanakis and Tsihrintzis (2012). Selanjutnya, Leto *et al.* (2013) melakukan penelitian dengan mengkaji perbandingan antara HF-CWs aliran permukaan dengan VF-CWs atau *hybrid* menggunakan *C. alternifolius* L dan *T. latifolia* dalam mengolah limbah perkotaan.

Jingtao *et al.* (2011) melakukan penelitian dengan mengkaji pengaruh pH dan suhu pada HF-CWs, VF-CWs *downflow* dan kombinasi kedua metode terhadap penurunan air limbah. Pengaruh perbedaan kandungan COD rendah dan tinggi terhadap respon tanaman *T.angustifolia* L pada HF-CWs. Selanjutnya, penelitian yang dilakukan oleh Pedescoll *et al.* (2011) tentang pengaruh operasi sistem *batch* HF-CWs dan operasi HUSB (*hydrolytic upflow sludge blanket*) terhadap penurunan BOD dan COD. Penggunaan pengaruh *settling* dan *sedimentation* pada HF-CWs terhadap penurunan materi organik limbah. Efek spesies *T.latifolia* dan *C. alternatifolius* L sebagai fitoremediasi terhadap penurun TSS, BOD, COD,

TN dan NH₄, TP, Total Coliform dan fecal coli pada HF-CWs aliran permukaan atas telah dikaji lebih lanjut oleh Leto *et al.* (2013).

Akratos *and* Tsihrintzis (2006) mengkaji pengaruh penggunaan tanaman *P. australis* dan *T. latifolia*, pengaruh suhu terhadap penurunan kandungan BOD, N dan PO₄. Kissoon *et al.* (2011) mengkaji beberapa elemen akumulasi di bawah dekat akar secara signifikan lebih besar pada tanaman tumbuh di bawah lahan basah dibandingkan dengan lahan kering. Demirezen *and* Aksoy (2004) mengkaji perbandingan jaringan *T. angustifolia* mengakumulasi logam berat (Ni dan Pb) lebih rendah dari pada akar. Jaringan *T. angustifolia* mengakumulasi logam berat lebih besar daripada jaringan *P. pectinatus* (L). Kemampuan *T. angustifolia* dalam mengakumulasi logam berat Pb dan Ni lebih besar di akar dibandingkan dengan jaringan *P. pectinatus*. Chandra *and* Yadav (2010) menggunakan ketebalan media tunggal 55 cm dan densitas tanaman 4,2/cm² pada HF-CWs dan waktu observasi berturut-turut: 0, 20, 40, dan 60 hari telah menghasilkan *T. angustifolia* dapat digunakan sebagai *fitoremediator* logam berat, melanoidin, dan fenol dari limbah industri.

Brix *and* Arias (2005) mengkaji *effective size (ES)* dan ukuran keseragaman media (*UC*) yang direkomendasikan yaitu kurang dari 3,5. ASTM (2010) telah menetapkan kriteria pasir yang digunakan sebagai media pasir pada *ES* berkisar 0,3—0,7 mm. Campella *and* Ogden (1999) menyatakan porositas pasir melebihi 70 % ukuran porinya besar. Jadi, daya hantar air limbah menjadi lebih cepat. Sebaliknya, porositas kurang dari 40 % pori-pori lebih kecil, maka daya hantar air limbah lebih lambat. Leverens *et al.* (2008) menganalisis penyumbatan lapisan di atas dari media pasir dapat meningkatkan waktu tinggal air rata-rata dalam filter dan mengurangi di daerah yang digenangi air. Akumulasi mikroorganisme pada permukaan sebagai *biofilm* diyakini menjadi penyebab penutupan permukaan. Dalam proses

ini, *polimer ekstraseluler* terhidrasi serta sel menumpuk pada lapisan di atas media pasir dan menimbulkan penurunan *permeabilitas* (Schwager and Boller, 1997).

Berdasarkan kajian tentang HF-CWs baik aliran permukaan atas maupun bawah, dan VF-CWs sistem *downflow* atau kombinasi (*hybrid*) antara keduanya, serta penggunaan media pasir pada CWs. Berdasarkan beberapa uraian terkait dengan penelitian sebelumnya, maka belum ditemukan kajian tentang penurunan kandungan bahan pencemar limbah lindi menggunakan CWs sistem *upflow* yang mengkombinasikan densitas tanaman *T. angustifolia* L dan ketebalan media pasir yang variatif. Peneliti ingin mendalami faktor-faktor yang berpengaruh, pengaruh interaksi, dan perbedaan serta korelasi dari densitas tanaman *T. angustifolia* L dan ketebalan media pasir dalam penurunan kandungan limbah lindi sistem *upflow* pada CWs.

Berdasarkan uraian yang disampaikan rumusan masalah, maka pertanyaan umum yang diajukan berkaitan dengan kajian penurunan bahan pencemar limbah lindi adalah apakah densitas tanaman *T. angustifolia* L dan ketebalan media pasir pada CWs sistem *upflow* dapat menurunkan kandungan bahan pencemar dari lindi? Beberapa pertanyaan spesifik di dalam rancangan ini sebagai berikut.

1. Bagaimana pengaruh densitas tanaman *T. angustifolia* L dan **ketebalan media pasir pada CWs sistem *upflow*** berdasarkan waktu **terhadap** efisiensi penurunan TDS, BOD, COD bahan pencemar dari limbah lindi?
2. Bagaimana pengaruh interaksi densitas tanaman *T. angustifolia* L dan **ketebalan media pasir pada CWs sistem *upflow*** berdasarkan waktu **terhadap** efisiensi penurunan TDS, BOD, COD bahan pencemar dari limbah lindi?

3. Apakah terdapat perbedaan, dan korelasi logam berat Pb di: *effluent*, media pasir, akar dan daun tanaman *T.angustifolia* L pada CWs sistim *upflow* yang dapat digunakan sebagai bioakumulasi?
4. Bagaimana implikasi CWs sebagai metode bentuk rekayasa teknis untuk penurunan kandungan bahan pencemar dari limbah lindi terhadap pencemaran air?

C. Orisinalitas dan Kebaruan

1. Orisinalitas

Penelitian tentang *mitigasi* limbah lindi dengan sistem lahan basah buatan aliran permukaan horizontal dan vertikal (*downflow*) atau kombinasi dari keduanya telah banyak dilakukan hingga saat ini. Orisinalitas penelitian ini adalah pemanfaatan media pasir tersusun, CWs sistem aliran ke atas (*upflow*), dan peran tumbuhan *T. angustifolia* L untuk menurunkan kandungan bahan pencemar limbah lindi yang merupakan teknik pengolahan limbah. Beberapa penelitian yang telah dipublikasikan melalui Jurnal Internasional terindeks berkaitan dengan penelitian ini digunakan untuk menganalisis tingkat keaslian (orisinalitas) disertasi yang disajikan pada Lampiran 1 dan 2. Berdasarkan hasil kajian dari jurnal terindeks seperti pada Lampiran 2, menunjukkan bahwa penelitian tentang penurunan kandungan bahan tercemar limbah lindi yang menggunakan metode lahan basah buatan (CWs) dengan sistem *upflow* belum pernah diteliti. Berkaitan dengan orisinalitas tersebut, yang mendorong penulis melakukan penelitian ini lebih lanjut.

2. Kebaruan (*Novelty*)

Mengkaji aspek yang dihasilkan dalam temuan penelitian ini, maka unsur kebaruan adalah lahan basah buatan (CWs) sistem aliran ke atas (*upflow*) dengan mengombinasikan densitas tanaman *T.angustifolia* L yang berbeda dan ketebalan media pasir yang variatif dapat menurunkan kandungan bahan pencemar limbah lindi. Kebaruan (*novelty*) yang dihasilkan dari penelitian ini dapat diuraikan menjadi 2 aspek, yaitu:

- a. Konsep interaksi densitas tanaman *T. angustifolia* L dan ketebalan media pasir terhadap efisiensi penurunan bahan pencemar limbah lindi pada CWs sistem *upflow*.
- b. Lahan basah buatan (CWs) aliran ke atas (*upflow*) sebagai metode dalam rekayasa teknik penurunan kandungan bahan pencemar limbah lindi.

D. Tujuan Penelitian

1. Tujuan Umum

Untuk mengkaji efisiensi penurunan kandungan bahan pencemar dari limbah lindi menggunakan densitas tanaman *T. angustifolia* L dan ketebalan media pasir pada CWs sistem *upflow*.

2. Tujuan Khusus

- a. Mengkaji pengaruh densitas tanaman *T.angustifolia* L, dan **ketebalan media pasir pada CWs sistem *upflow* berdasarkan waktu terhadap** efisiensi penurunan TDS, BOD, COD bahan pencemar limbah lindi.

- b. Mengkaji pengaruh interaksi antara densitas tanaman *T. angustifolia* L dan **ketebalan media pasir pada CWS sistem *upflow* berdasarkan waktu terhadap** efisiensi penurunan TDS, BOD, COD bahan pencemar limbah lindi.
- c. Mengkaji perbedaan, dan korelasi logam berat Pb di: *effluent*, media pasir, akar dan daun tanaman *T.angustifolia* L pada CWS sistim *upflow* yang dapat digunakan sebagai bioakumulasi.
- d. Mengkaji implikasi CWS aliran ke atas (*upflow*) sebagai metode bentuk rekayasa teknik dalam penurunan kandungan bahan pencemar dari limbah lindi terhadap pencemaran air.

E. Manfaat Penelitian

1.Manfaat Akademik

- a. Sebagai sumbangan pemikiran dan informasi ilmiah berkait dengan kegiatan penelitian ini bagi kalangan akademisi.
- b. Dapat memberikan referensi berkait pengembangan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi (Iptek) tentang *mitigasi* limbah lindi (*leachate*) dengan metode lahan basah buatan (*constructed wetlands*) bagi peneliti selanjutnya.

2.Manfaat Praktis

- a. Sebagai informasi kepada kalangan masyarakat umum dan komunal tentang *mitigasi* pencemaran lindi terhadap air tanah dengan menggunakan sistem lahan basah buatan (*constructed wetland*).
- b. Dapat memberikan kontribusi kepada pemerintah berkait dengan perumusan metode dan menentukan strategi teknis tentang *mitigasi* pencemaran lingkungan dari limbah lindi.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Tempat Pembuangan Akhir dan Permasalahan

Tempat Pembuangan Akhir (TPA) merupakan suatu tempat pembuangan sampah bagi penduduk kota. Berbagai jenis sampah perkotaan diangkut oleh bak-bak sampah kemudian dikumpulkan di TPS, selanjutnya diangkut oleh truk sampah untuk dibuang ke TPA. Secara umum, bahan organik yang ada di TPA sampah bersifat mudah terurai (*biodegradable*), tidak stabil, dan cepat menjadi busuk. Hal ini dikarenakan bahan organik tersebut mengalami proses *degradasi* yang menghasilkan zat hara, zat kimia toksik, bahan organik sederhana, serta akan menimbulkan bau yang menyengat dan mengganggu.

Sistem pengelolaan sampah di TPA terbagi atas 3 bagian, yaitu sistem *open dumping*, *controlled landfill*, dan *sanitary landfill*. Pada sistem *open dumping* di mana sampah hanya ditumpuk di lokasi pembuangan sampah. Pengelolaan sampah hanya dilakukan dengan mengatur sampah supaya teratur ditimbun dan air lindi dialirkan untuk diolah lebih lanjut. Sementara *controlled landfill* dan *sanitary landfill* perlu dilakukan penutupan akhir sampah, sehingga pada *sanitary landfill* dilakukan penutupan sampah setiap harinya dan *controlled landfill* dilakukan penutupan sampah antara 5—7 hari (Tchobanoglous *et al.*, 1993).

Lindi memiliki karakteristik tertentu. Hal ini disebabkan limbah padat yang dibuang pada lokasi pembuangan sampah berasal dari berbagai sumber yang berbeda dengan tipe limbah yang berbeda pula. Menurut Damanhuri (2008), komposisi lindi tidak hanya dipengaruhi oleh sampah organik dan anorganik, tetapi juga mudah tidaknya penguraian, kondisi suhu, pH, kelembaban, umur, kuantitas, dan kualitas air yang dipengaruhi iklim dan

hidrogeologi, komposisi tanah penutup, ketersediaan nutrient dan mikroba, serta kehadiran inhibitor. Iklim merupakan faktor penting yang memengaruhi kuantitas dan kualitas lindi. Hujan menjadi fase transport untuk pencucian dan migrasi kontaminan dari tumpukan sampah dan memberikan kelembaban yang dibutuhkan untuk aktivitas biologis. Umur tumpukan sampah juga memengaruhi kualitas lindi dan gas yang terbentuk.

1. Dampak Sampah terhadap Manusia dan Lingkungan

Menurut Direktorat Pengembangan Kelembagaan/SDM (1997), potensi bahaya yang ditimbulkan sampah terhadap kesehatan di antaranya sebagai berikut.

- a. Penyakit diare, kolera, tipes menyebar dengan cepat karena virus yang berasal dari sampah, dengan pengelolaan tidak tepat dapat bercampur air minum.
- b. Penyakit jamur dapat juga menyebar (jamur kulit).
- c. Suatu penyakit yang ditularkan oleh cacing pita (*taenia*), di mana cacing ini sebelumnya masuk ke dalam pencernaan binatang ternak melalui makanannya yang berupa sisa makanan atau sampah.
- d. Kasus di Jepang telah dilaporkan sekitar 40.000 orang meninggal akibat mengonsumsi ikan yang telah terkontaminasi oleh Hg.
- e. Pengelolaan sampah yang kurang baik berdampak kurang menyenangkan bagi masyarakat, seperti bau yang tidak sedap.
- f. Pengelolaan sampah yang tidak memadai menyebabkan rendahnya derajat kesehatan masyarakat.

g. Infrastruktur lain dapat juga dipengaruhi oleh pengelolaan sampah yang tidak memadai, seperti tingginya biaya yang diperlukan untuk pengolahan air. Jika sarana penampungan sampah kurang atau tidak efisien, orang akan cenderung membuang sampahnya di jalan.

2. Permasalahan di TPA

Selain lahan TPA sampah yang saat ini semakin terbatas, pengelolaan sampah di daerah-daerah yang kurang efektif dan tidak efisien menyebabkan permasalahan di TPA. Sampah dapat memberikan kontribusi dalam persoalan lingkungan hidup. Oleh karena itu, diperlukan upaya sistematis dan terorganisasi untuk meminimalkannya melalui kerjasama pengelolaan TPA terpadu antardaerah. Sunardi (2000) mengatakan tahun 1999 biaya pemusnahan sampah relatif tinggi mencapai 93 %. Hal ini mengakibatkan meningkatnya penggunaan metoda pembuangan sampah dengan *open dumping*, sehingga biaya yang dikeluarkan untuk metoda *open dumping* relatif lebih rendah dibanding dengan metoda lainnya.

Sampah yang dibuang dengan sistem *open dumping* dapat menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan. Penimbunan dengan sistem *anaerobik landfill* akan timbul lindi (*leachate*) di dalam lapisan timbunan dan akan merembes ke dalam lapisan tanah. *Leachate* ini sangat merusak dan dapat menimbulkan bau tidak sedap. Contoh konflik persampahan yang terjadi pada TPA Bojong merupakan kasus kedua yang terjadi di lokasi pengolahan akhir sampah DKI Jakarta. Kasus pertama terjadi di TPA sampah Bantargebang kota Bekasi tahun 2004 berdampak terhadap penutupan area tersebut. Menurut analisis reportase, konflik persampahan di TPA Bantargebang merupakan konflik persampahan Pemerintah DKI Jakarta dengan Pemerintah Kota Bekasi dalam menangani TPA sampah Bantargebang.

Mengacu pada Perda nomor 17 tahun 2000 tentang RT/RW Kabupaten Bogor, tidak ada satu pun pasal yang menyebutkan bahwa kawasan tersebut ditetapkan sebagai lokasi TPA. Justru sebaliknya, kawasan tersebut diperuntukkan sebagai kawasan pengembangan perkotaan dan salah satunya diperuntukan bagi pengembangan kawasan pariwisata. Musim kemarau curah hujan sedikit, lokasi ini akan menjadi daerah resapan. Namun pada musim hujan akan berubah menjadi daerah pengeluaran air yang bersifat temporer, yang muncul dalam bentuk mata air musiman di dasar lembah yang dapat berpindah dari elevasi satu ke elevasi lainnya. Akibat terjadinya *up-lift* yang diakibatkan oleh akumulasi air yang terbentuk di timbunan sampah pada musim hujan, sehingga sampah bergerak dalam bentuk longsor.

3. Pencemaran Lingkungan dari Limbah Lindi

a. Gangguan terhadap Kesehatan

Lindi berfungsi sebagai pembawa penyakit, karena di dalamnya terdapat bakteri patogen yang berasal dari sampah. Menurut Dinas Kesehatan Kota Bekasi (2000), jenis penyakit dengan frekuensi tinggi yang ditemukan pada masyarakat di sekitar TPA sampah Bantar Gebang adalah ISPA, kulit, dan gastritis. Penyakit tersebut dapat disebarluaskan melalui lindi yang telah terkontaminasi oleh bakteri patogen sebagai akibat lindi yang masuk ke badan air di sekitar TPA sampah. Hasil penelitian yang dilakukan Kusumawati (2012) menunjukkan bahwa sumur milik penduduk yang berada di sekitar TPA Sampah Putri Cempo Surakarta mengandung jumlah *E. coli* di atas baku mutu. Demikian halnya dengan sampel air yang diambil dari area persawahan di sekitar TPA sampah milik Pemda Kota Bogor, juga mengandung *E. coli* di atas baku mutu (DKP Kota Bogor, 2003). Contoh lain kasus di bagian Utara pusat Akdere kota Turkey yang dikaji oleh Baykara *et al.*, (2004) menunjukkan bahwa

sekitar radius 15 Km dari TPA terdapat 500 ton limbah padat. Di mana air limbahnya dapat menyebabkan pencemaran air tanah dan lingkungan yang disebabkan oleh kontaminan zat radioaktif, seperti *alfa* dan *betha* yang nilainya lebih besar dari 0,07—2,17 mg/kg dari nilai literatur yang disyaratkan.

b. Gangguan terhadap Kehidupan Biotik

Zat pencemar yang ada di dalam lindi dapat menyebabkan menurunnya kadar oksigen yang terlarut di dalam air. Hal ini mengakibatkan kehidupan di dalam air yang membutuhkan oksigen akan terganggu, sehingga dapat mengurangi perkembangan dan menyebabkan kematian. Contoh kasus tercemarnya air tanah yang disebabkan oleh limpasan limbah lindi hingga sejauh 10 Km ke arah Timur kota Patras Greece tahun 1993 telah dilaporkan oleh Bougioukou *et al.* (2005). Selain menyebabkan kematian ikan dan bakteri, polutan yang terdapat dalam lindi juga menyebabkan kerusakan pada tanaman dan tumbuhan air. Kematian bakteri menyebabkan proses penjernihan sendiri (*self purification*) menjadi terhambat. Akibatnya, air limbah akan sulit untuk diuraikan (Sastrawijaya, 2000).

Contoh kasus lain yang dikaji lebih lanjut oleh Melnyk *et al.* (2014). Melnyk *et al.* (2014) mengkaji TPA di kota Gdansk-Polandia dari 33,8 ha TPA yang beroperasi sejak tahun 1973. Kegiatan TPA tersebut telah menyebabkan dampak menurunnya kualitas air permukaan (*surface waters*) yang tercemar TOC (*total organic carbon*) yang tidak terdeteksi dalam monitoring program selama 2 tahun terakhir, yakni antara tahun 2010—2012. Berdasarkan kasus tersebut tingkat kematian *Thamnocephalus platyurus* sangat tinggi karena terindikasi adanya TOC dalam air permukaan.

c. Gangguan terhadap Keindahan dan Kenyamanan

Bau dapat disebabkan oleh hidrogen sulfida yang dihasilkan melalui proses pembusukan bahan organik secara anaerobik, sedangkan gangguan warna dan rasa dapat disebabkan oleh senyawa organik (Sugiharto, 1987).

d. Gangguan terhadap Benda

Kerusakan pada benda dapat disebabkan oleh keberadaan gas karbondioksida dalam air limbah. Gas ini bersifat korosif, sehingga dapat mempercepat proses terjadinya karat pada benda yang terbuat dari besi dan dapat menimbulkan kebocoran. Selain keberadaan lemak pada air limbah juga dapat menimbulkan masalah karena pada suhu tinggi berbentuk cair, namun dalam suhu normal akan menggumpal pada saluran perpipaan (Sastrawijaya, 2000).

B. Indikator Pencemaran Air

Air permukaan dan tanah dapat tercemar oleh limpasan limbah lindi yang tidak terolah. Menurut *Environment Protection Authority* (EPA, 1996), lindi merupakan perkolasi cairan lindi sebagai hasil *infiltrasi* dan/atau *dekomposisi* limbah. Hal ini terjadi karena banyak kasus pencemaran air apabila tidak dikelola sebagaimana mestinya. Air permukaan dari limpasan lokasi lindi dapat menyebabkan beban pengendapan yang tidak diterima di dalam air penerima, sementara limpasan lindi yang berlebihan dapat berperan meningkatkan tidak terkontrolnya air permukaan menjadi tercemar.

Ada tiga cara mengetahui indikator air di lingkungan telah tercemar. Pertama, pengamatan fisik yaitu pengamatan pencemaran air berdasarkan tingkat kekeruhan, perubahan suhu, warna, bau dan rasa. Kedua, pengamatan kimiawi yaitu pengamatan

pencemaran air berdasarkan zat kimia yang terlarut, perubahan pH. Ketiga, pengamatan biologis yaitu pengamatan pencemaran air berdasarkan mikroorganisme yang ada di dalam air, terutama ada tidaknya bakteri patogen. Indikator kandungan zat organik di dalam limbah cair perlu dilakukan pengukuran secara kualitas dan kuantitas. Pengukuran kandungan zat organik dapat dilakukan dalam bentuk pengukuran: pH, DO, TSS, TDS, BOD, dan COD (Asmadi dan Suharno, 2012).

1. pH atau Derajat Keasaman

Air secara normal yang memenuhi syarat untuk suatu kehidupan mempunyai pH sekitar 6,5—7,5. Air akan bersifat asam atau basa bergantung besar kecilnya pH. Bila pH di bawah pH normal, maka air tersebut bersifat asam sedangkan air yang mempunyai pH di atas pH normal bersifat basa. Biota akuatik sebagian besar sensitif terhadap perubahan pH dan menyukai pH antara 7—8,5. Nilai pH sangat mempengaruhi proses biokimiawi perairan, misalnya proses *nitrifikasi* akan berakhir pada pH yang rendah. pH kurang dari 4, sebagian besar menyebabkan tumbuhan air mati karena tidak dapat bertoleransi terhadap pH rendah. Namun ada sejenis *algae* yaitu *Chlamydomonas acidophila* mampu bertahan pada pH sebesar 1 dan *algae Euglena* pada pH sebesar 1,6 (Sawyer and McCarty, 1989).

2. Oksigen Terlarut (DO)

Mikroorganisme di dalam air tidak dapat hidup tanpa oksigen terlarut. Karena oksigen terlarut digunakan untuk proses degradasi senyawa organik dalam air. Oksigen yang dihasilkan dari reaksi fotosintesa *algae* tidak efisien, karena oksigen yang terbentuk akan

digunakan kembali oleh algae untuk proses metabolisme pada saat tidak ada cahaya. Berdasarkan temperatur, dan tekanan, kelarutan oksigen jenuh dalam air pada 25°C dan tekanan 1 atmosfer sebesar 8,32 mg/L (Sugiharto, 1987).

Ikan dan organisme akuatik lain membutuhkan oksigen terlarut dengan jumlah cukup banyak. Kebutuhan oksigen ini bervariasi antarorganisme. Keberadaan logam berat yang berlebihan di perairan akan memengaruhi sistem respirasi organisme akuatik, sehingga pada saat kadar oksigen terlarut rendah dan terdapat logam berat dengan konsentrasi tinggi, organisme akuatik menjadi lebih menderita (Sawyer *and* McCarty, 1989). Kadar oksigen terlarut dapat melebihi kadar oksigen jenuh, sehingga perairan mengalami *supersaturasi*. Sedangkan pada malam hari, tidak ada fotosintesa, tetapi respirasi terus berlangsung. Pola perubahan kadar oksigen ini mengakibatkan terjadinya fluktuasi harian oksigen pada lapisan *eufotik* perairan. Kadar oksigen maksimum terjadi pada sore hari dan minimum pada pagi hari (Sugiharto, 1987).

3. Total Dissolved Solid (TDS)

Padatan terlarut total (TDS) mencerminkan jumlah kepekatan padatan dalam suatu contoh air. Juga dinyatakan dalam milligram per liter atau dalam bagian per juta (Alaerts dan Santika, 1984). Penentuan TDS dapat cepat menentukan kualitas air contoh, caranya menguapkan air dengan volume tertentu yang telah disaring untuk memisahkan padatan yang tersuspensi sehingga kering. Sisa padatan ditimbang kemudian digunakan untuk menentukan padatan terlarut (Sastrawijaya, 2000).

4. Kebutuhan Oksigen Biokimia (BOD)

BOD adalah banyaknya oksigen yang dibutuhkan oleh mikroorganisme dalam lingkungan air untuk memecah (*mendegradasi*) bahan buangan organik yang ada dalam air menjadi karbondioksida dan air. Pada dasarnya, proses oksidasi bahan organik berlangsung cukup lama (Sawyer dan McCarty, 1989). Untuk kepentingan praktis, proses oksidasi dianggap lengkap selama 20 hari, tetapi penentuan BOD selama 20 hari dianggap masih cukup lama. Penentuan BOD ditetapkan selama 5 hari *inkubasi*, maka biasa disebut BOD₅. Selain memperpendek waktu yang diperlukan, hal ini juga dimaksudkan untuk meminimumkan pengaruh oksidasi ammonia yang menggunakan oksigen juga. Selama 5 hari masa inkubasi, diperkirakan di level 70—80 % bahan organik telah mengalami oksidasi (Effendi, 2003).

Air yang bersih relatif mengandung mikroorganisme lebih sedikit dibanding yang tercemar. Air yang telah tercemar oleh bahan buangan yang bersifat antiseptik atau bersifat racun, seperti fenol, kreolin, detergen, asam cianida, insektisida, dan sebagainya, jumlah mikroorganismenya relatif sedikit. Sehingga semakin besar kadar BOD di dalam air, maka merupakan indikasi bahwa perairan tersebut telah tercemar. Sebagai contoh, kadar maksimum BOD₅ yang diperkenankan untuk kepentingan air minum dan menopang kehidupan organisme akuatik adalah 3,0—6,0 mg/l berdasarkan (APHA-AWWA, 1998). Pengukuran kandungan BOD dapat dilakukan mengacu pada SNI 6989.72-2009.

Berdasarkan PPRI nomor 82 tahun 2001 klasifikasi mutu air ditetapkan menjadi 4 kelas, yakni kelas I, II, III, dan IV. Baku mutu limbah sesuai peruntukannya dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 : Baku Mutu Limbah Sesuai dengan Peruntukannya

No	Parameter	Baku Mutu Air Kelas dalam Satuan			
		I	II	III	IV
1	BOD (mg/L)	2	3	6	12
2	COD (mg/L)	10	25	50	100
3	TDS (mg/L)	1000	1000	1000	2000
4	pH	6—9	6—9	6—9	5—9
5	DO (mg/L)	6	4	3	0
6	Pb (mg/L)	0,03	0,03	0,03	1

Sumber: Lampiran PPRI nomor 82 tahun 2001.

Keterangan Tabel 1: Nilai tersebut merupakan batas maksimum, kecuali nilai pH dan DO. DO merupakan batas minimum, pH merupakan nilai rentang tidak boleh kurang atau lebih dari nilai tersebut.

5. Kebutuhan Oksigen Kimiawi (COD)

COD adalah jumlah oksigen yang diperlukan agar bahan buangan yang ada dalam air dapat teroksidasi melalui reaksi kimia baik yang dapat didegradasi secara biologis maupun yang sukar didegradasi (Alaerts dan Santika, 1984). Bahan buangan organik tersebut akan dioksidasi oleh kalium bichromat yang digunakan sebagai sumber oksigen (*oxidizing agent*) menjadi gas CO₂ dan gas H₂O serta sejumlah ion chrom. Pengukuran nilai COD berdasarkan SNI 06-6989.2-2004. Di mana dengan refluks tertutup secara *spektrofotometri* prosedur pengukurannya, dengan panjang gelombang 600 nm, menggunakan blanko yang tidak direfluks sebagai larutan referensi.

Pada perairan terdapat bahan organik yang resisten terhadap degradasi biologis, misalnya tannin, fenol, polisakarida dan sebagainya, maka lebih cocok dilakukan

pengukuran COD daripada BOD. Kenyataannya hampir semua zat organik dapat dioksidasi oleh oksidator kuat seperti kalium permanganat dalam suasana asam, diperkirakan 95—100 % bahan organik dapat dioksidasi. Seperti pada BOD, perairan dengan nilai COD tinggi tidak diinginkan bagi kepentingan perikanan dan pertanian.

Nilai COD pada perairan yang tidak tercemar biasanya kurang dari 20 mg/L, sedangkan perairan tercemar dapat lebih dari 200 mg/L dan limbah industri dapat mencapai 60.000 mg/L (APHA-AWWA, 1998). Sebagai bandingan besarnya kandungan antara BOD, COD, residu tersuspensi, dan pH sesuai dengan baku mutu limbah yang diperbolehkan untuk dibuang ke badan air di Indonesia. Hal ini telah dijelaskan pada Tabel 1 di depan.

Tabel 2: Komposisi Limbah Lindi *Landfill*

No	Paremter	Landfill baru 2 tahun	Tipikal	Landfill > 10 tahun
1	BOD (mg/L)	2000—30.000	10.000	100—200
2	COD (mg/L)	2000—60.000	6.000	100—500
3	Total Suspended Solid (mg/L)	200—2000	500	100—400
4	pH	4,5—7,5	6	6,6—7,5

Sumber: Tchobanoglous *et al.*, (1993).

6. Timbal (Pb)

Logam berat di alam secara natural dibutuhkan oleh tumbuhan dalam jumlah cukup sebagai kebutuhan nutrisi mikro. Konsentrasi Pb terlalu tinggi di dalam tanah mempunyai efek berkurangnya mikroorganisme, akhirnya berpengaruh pada kualitas tanah dan produktifitas primer. Kandungan logam berat dan *nutrisi mikro* di dalam tanaman harus di bawah ambang batas, agar tidak beracun bagi makhluk lainnya. Menurut Sasmaz *et al.* (2008), logam berat Pb

dewasa ini perlu mendapat perhatian serius yakni sebagai polutan kimia utama lingkungan dan sebagai unsur yang merupakan racun bagi tanaman.

Menurut EPA (2011), toksisitas logam berat Pb pada tumbuhan dapat mengganggu pertumbuhan, fotosintesis, mitosis, dan penyerapan air. Sedangkan pada hewan mengganggu sistem saraf, ginjal, liver, sterilitas, mengganggu pertumbuhan, penurunan pertumbuhan, dan gangguan darah. Indonesia sampai saat ini belum memiliki regulasi dan baku mutu yang mengatur nilai ambang batas logam berat yang diperbolehkan di dalam tanah yang diperuntukkan bagi pertanian atau kegiatan lain yang berkaitan makhluk hidup. Menurut *Environment Protection Authority* (EPA, 1993), batas logam berat Pb yang diperbolehkan di dalam tanah sebesar 420 ppm. Sementara itu, menurut MOE (1991) Jepang mengeluarkan standar baku mutu logam berat Pb di dalam tanah dengan konsentrasi ≤ 150 mg/kg, dan standar *leachate* tanah $\leq 0,01$ mg/kg. Kandungan logam berat dan nutrisi mikro di dalam tanaman harus di bawah ambang batas, agar tidak beracun bagi makhluk lainnya. Kabata-Pendias dan Pendias (2001) mengatakan kisaran logam pada jaringan tanaman normal untuk kandungan Pb antara 3—20 mg/kg diukur sebagai bioakumulasi logam di jaringan tanaman. Pengukuran bioakumulasi logam Pb di dalam organ tanaman dapat dilakukan dengan cara melakukan pengukuran berat basah, kering pada akar dan daun tanaman, serta kandungan logam Pb yang tersisa di dalam tanah dan organ tanaman, seperti persamaan (2.1).

$$RE = \frac{(\text{jumlah logam di daun } (\frac{\text{mg}}{\text{kg}}) \times \text{biomassa daun (kg)} + \text{jumlah logam di akar } (\frac{\text{mg}}{\text{kg}}) \times \text{biomassa akar (kg)})}{\text{jumlah logam yang di media (mg)}} \times 100 \%$$

Arifin *et al.* (2012) (2.1).

C. Limbah Lindi (*Leachate*) dan Pengolahannya

1. Karakteristik Lindi

Lindi dapat didefinisikan sebagai cairan yang telah melewati sampah yang telah mengekstraksi material terlarut atau tersuspensi dari sampah tersebut. Lindi diproduksi ketika air atau cairan lainnya melakukan kontak langsung dengan sampah yang terutama berasal dari buangan domestik, di mana hal tersebut tidak dapat dihindari pada tempat pembuangan akhir. Masuknya cairan tersebut dapat menambah volume lindi yang kemudian disimpan dalam rongga antar komponen sampah dan akan mengalir jika memungkinkan (Tchobanoglous *et al.*, 1993). Secara umum, lindi mengandung logam berat, zat organik dan zat anorganik seperti amonia, sulfat, dan logam-logam kation (Yalcuk *and* Ugurlu., 2008). Bahan organik di dalam lindi adalah komponen yang *biodegradable* dan ammonia. Komponen tersebut merupakan zat yang terdapat dalam lindi dan dapat mengancam lingkungan secara signifikan (Mehmood *et.al.*, 2009).

Karakteristik lindi secara umum meliputi warnanya coklat muda sampai mendekati hitam, umumnya berbau busuk, dan menghasilkan warna pelangi pada permukaan air. Potensial polusinya lebih kurang 10—100 kali dari air buangan lainnya. Tchobanoglous *et al.* (1993) mengatakan rasio BOD/COD dapat dijelaskan sebagai berikut. Pertama, tahap awal *biodegradasi landfill*, rasio BOD/COD adalah 0,6 atau lebih. Kedua, tahap proses *biodegradasi*, rasio BOD/COD 0,4—0,6. Ketiga, tahap pematangan *landfill*, rasio BOD/COD adalah 0,05—0,2. Selanjutnya, Tchobanoglous *et al.* (1993) telah menambahkan bahwa komposisi kimia lindi dapat dilihat pada Tabel 2.

2. Faktor-faktor yang Memengaruhi Kualitas Lindi

Menurut Tchobanoglous *et al.* (1993), faktor-faktor yang memengaruhi kualitas lindi (*leachate*) sebagai berikut:

a. Komposisi Sampah

Fraksi organik sampah secara alami dipengaruhi oleh *degradasi* sampah di dalam *landfill* dan juga kualitas lindi yang diproduksi. Kehadiran substansi yang beracun bagi bakteri akan memperlambat proses *degradasi*. Kandungan organik lindi bergantung pada kontak antara sampah dengan air yang merembes sebagaimana halnya pH dan kesetimbangan kimia pada *solid liquid interface*. Konsentrasi logam yang terkandung dalam sampah akan menurun dibawah kondisi asam.

b. pH (Derajat Keasaman)

pH memengaruhi proses kimia yang merupakan basis dan transfer massa dalam sistem lindi sampah, seperti *presipitasi*, *dissolusi*, *redoks*, dan reaksi penyerapan. Umumnya kondisi asam yang menandakan proses *anaerobik* dimulai dengan meningkatkan *solubilitas* kandungan kimia. Kondisi penurunan berhubungan dengan fase kedua atau ketiga dari degradasi *anaerobik* yang akan memengaruhi kelarutan nutrien dan logam dalam lindi.

c. Umur *Landfill*

Umur *landfill* mempunyai peran penting dalam penentuan karakteristik lindi yang diatur oleh tipe proses stabilisasi sampah. Polutan dalam lindi umumnya mencapai maksimum pada operasi *landfill* selama 2—3 tahun, selanjutnya menurun pada tahun berikutnya (Damanhuri, 2008). Menurut Lim (1998), menyatakan kualitas lindi sebagai suatu hasil proses

dari peruraian tumpukan sampah oleh limpasan air hujan dan telah mengalami degradasi secara alami. Semakin tua usia TPA, maka kandungan organiknya semakin menurun.

3. Pengolahan Limbah Lindi (*Leachate*)

Menurut Tchobanoglous *et al.* (1993) dan Shubiao *et al.* (2014), ada beberapa alternatif pengolahan lindi di antaranya dengan pengolahan biologis, fisik dan kimiawi, *recycle* lindi, evaporasi, dan evapotranspirasi lindi.

a. Biologis, Fisik dan Kimiawi

Prinsip operasi dan pengolahan lindi secara biologi, fisik, dan kimia yang digunakan dipilih berdasar kontaminan yang akan mengalami penurunan. Proses pengolahan secara biologis sangat efektif untuk mengurangi zat organik yang mudah terdegradasi (EPA, 1998). Pengolahan biologis mampu menurunkan COD mencapai 50 %. Cara inipun efektif untuk mengoksidasi amonium menjadi nitrat dengan proses *nitrifikasi* dan *denitrifikasi*. Menurut Kampman *et al.* (2012) *denitrifikasi* dapat ditingkatkan dengan pasokan eksternal donor elektron melalui penambahan karbon organik langsung menggunakan media filtrasi organik, sedangkan pengolahan biologis secara umum dapat menekan biaya dibanding pengolahan secara fisik dan kimia (Stegman, 1992).

b. *Recycle* / *Resirkulasi* Limbah Lindi

Metoda yang sering digunakan dalam pengolahan lindi adalah dengan resirkulasi lindi. Awal pengoperasian nilai COD, BOD, dan nutrien bernilai tinggi, sehingga saat diresirkulasi unsur-unsur tersebut akan berkurang melalui aktivitas kimia, fisika, dan biologis (EPA, 1998).

Efek resirkulasi dapat meningkatnya penurunan COD, dan desain yang tepat sebuah *system* VF-CWs (Lavrova and Koumanova, 2009). Resirkulasi dalam sistem pengolahan air limbah bertujuan untuk meningkatkan kinerja. Perihal tersebut bergantung banyak faktor, misalnya jenis organik dan beban *influen* CWs (Sun *et al*, 2003; Arias *et al.*, 2005; dan Shubiao *et al*, 2014).

c. Evaporasi dan Evapotranspirasi Limbah Lindi

Pengolahan lindi dengan cara *evaporasi* adalah konsep pengolahan yang paling sederhana. Sedangkan *evapotranspirasi* merupakan konsep pengolahan limbah dengan melibatkan peran tanaman air. Lindi yang telah terkumpul akan dibuang melalui proses *evaporasi* atau evapotranspirasi selama musim panas. Menurut Pedescol *et al.* (2013), penggunaan *evapotranspirasi* (ET) pada tanaman air aliran *hydrponic* memiliki kehilangan air 4 kali lebih besar dibanding dengan kondisi yang tanpa tanaman air. Sejalan dengan hal tersebut, lebih jauh terdapat perbedaan *evapotranspirasi* pada musim panas antara *T. angustifolia* lebih aktif daripada *P. australis*, di mana ET dari *T.angustifolia* $36,8 \pm 2,3$ mm/hari dan *P. australis* antara $23,0 \pm 1,9$ mm/hari untuk lahan basah hidroponik. Dua perihal tersebut kurang sesuai untuk lahan kering yang ditanami pada musim kering.

Sistem lain yang umum digunakan dalam pengolahan lindi adalah pengolahan secara alamiah. Konsep pengolahan secara alamiah juga dikaji oleh Haberl and Langergraber (2002). Ia menegaskan bahwa proses eliminasi polutan dalam air limbah terjadi melalui proses secara fisik, kimia, dan biologi yang cukup kompleks (EPA, 1998). Dalam peristiwa tersebut terdapat asosiasi antara media, tumbuhan *makrophyta*, dan mikroorganisme yang berinteraksi. Sistem pengolahan secara alamiah didesain untuk mengambil keuntungan dari proses alamiah yang terjadi meliputi berbagai proses secara mekanis dan menggunakan tanaman. Di antara

proses secara mekanis meliputi *sedimentasi, filtrasi, transfer gas, adsorpsi*, pertukaran ion, penguapan oksidasi, *reduksi*, konversi, *degradasi, aerated lagoon, activated sludge, trickling filter, filtration, ion exchange*, serta yang lebih modern seperti *ultrafiltration, nanofiltration* dan *reverse osmosis* (Renou *et al.*, 2008).

Proses menggunakan tanaman meliputi fotosintesis, fotooksidasi, dan penyerapan oleh tumbuhan. Dalam sistem alami proses tersebut terjadi pada batasan alami “*reaktor ekosistem*” yang berjalan secara simultan, berbeda dengan konsep pengolahan mekanis yang bekerja secara berurutan (Metcalf and Eddy, 1993). Sistem pengolahan *leachate* secara alami meliputi pengolahan dengan tanah atau *treatment system* seperti *slow rate, rapid infiltration*, dan *overland flow*. Pengolahan dengan menggunakan air seperti *constructed wetland* dan *natural wetland* atau pengolahan menggunakan tanaman air.

d. Pengolahan Limbah Menggunakan Lahan Basah (*Wetland*)

Definisi lahan basah atau *wetland* sangat beragam. Menurut KMNLH nomor 5 tahun 2000, keberadaan lahan basah atau lahan berawa dapat diklasifikasikan menjadi 3 zona, yaitu zona ekosistem rawa pasang surut air payau/salin, zona ekosistem rawa pasang surut air tawar, dan zona ekosistem rawa non-pasang surut atau lebak. Berdasarkan Ramsar, lahan basah (*wetland*) dibagi menjadi tiga kelompok utama, yaitu lahan basah pesisir dan lautan, lahan basah daratan, dan lahan basah buatan (*constructed wetland*) (LIPI, 2004).

Wetland adalah area yang setidaknya digenangi air secara *intermitten* (Campbell dan Ogden, 1999). Pengertian lainnya menyebutkan bahwa *wetland* adalah suatu lahan yang jenuh air dengan kedalaman air tipikal yang kurang dari 0,6 m yang mendukung pertumbuhan tanaman air *emergent* misalnya *Cattail, bulrush, umbrella plant* dan *sedges* (Metcalf and Eddy, 1993).

Wetland alami maupun buatan (CWs) berisi bermacam-macam tumbuhan dan bakteri yang sangat efektif dalam menurunkan konsentrasi *polutan* seperti *dekomposisi* dan *immobilisasi* bahan yang toksik (Novotny and Olem, 1994). *Constructed wetland* adalah pengolahan limbah secara alami yang terdiri dari tiga faktor utama. Pertama, area yang digenangi air dan mendukung hidupnya *aquatic plant* jenis *hydrophita*. Kedua, media tumbuh berupa tanah yang selalu digenangi air. Ketiga, media jenuh air *Wetland* alami maupun buatan (CWs) berisi bermacam-macam tumbuhan dan bakteri yang sangat efektif dalam menurunkan konsentrasi *polutan* meliputi *dekomposisi* dan *immobilisasi* bahan yang toksik (Novotny and Olem, 1994).

Menurut Vymazal (2008), lahan basah alami menggunakan tanaman untuk mengolah limbah diceritakan kali pertama oleh Dr Kathe Seidel di Germany. Dioperasikan secara penuh setelah tahun 1960-an dan sejak itulah lahan basah buatan menjalar di seluruh dunia. Terdapat variasi tipe CWs untuk mengolah air limbah. *Free water surface sistem* dengan variasi vegetasi, *free floating*, *floating leaved*, *submerged* dan *emergent* adalah tipe yang banyak digunakan oleh banyak negara. Berdasarkan tipe dan CWs, limbah dibedakan seperti pada Tabel 3.

Tabel 3: Tipe Lahan Basah Buatan (CWs) untuk Pengolahan Air Limbah

Deskripsi		Lahan Basah Buatan (<i>Constructed Wetlands</i>)			
Level air		<i>Free water surface</i> (FWS)		<i>Subsurface</i> (SSF)	
Tanaman		<i>Free floating</i>	<i>Floating level</i>	<i>Submerged</i>	<i>Emergent Emergent</i>
Arah Aliran		Horisontal		Horisontal Vertikal	
				<i>Down flow Upflow</i>	

Sumber: Vymazal. (2008).

Lahan basah (*wetland*) merupakan perairan tergenang (lentik) yang mengalami stratifikasi secara vertikal akibat perubahan intensitas cahaya dan perbedaan suhu secara vertikal. *Wetland* termasuk di wilayah air tergenang *litoral*. Pada wilayah ini banyak ditumbuhi *akuatik plant* yang mengakar sampai di dasar dan memiliki keaneragaman bentos yang cukup tinggi (Effendi, 2003).

Lahan basah (*wetland*) adalah sesuatu yang penting antara terestorial dan sistem perairan. Di samping itu merupakan habitat alam antara kehidupan spesies unik, di dalamnya termasuk reptil, ampibi, ikan, dan burung. Spesies-spesies tersebut juga sangat penting untuk siklus stabilitas air muara-danau dan erosi. Lebih dari 300 lahan basah telah dibangun di Amerika Utara untuk menyediakan sistem pengolahan air limbah dengan biaya murah dan pemeliharaan rendah (Andradottir, 2000).

Kemampuan lahan basah buatan untuk pengolahan air limbah, terutama di daerah tropis sangat tinggi. Pengurangan BOD dengan menggunakan proses ini bisa mencapai 65—85 %. Padatan tersuspensi dapat dikurangi dilevel 90 %, nutrien (nitrogen dan fosfor) dapat mencapai 85 % serta pengurangan organisme patogen mencapai 99,5 %. Dua sistem lahan basah buatan yang telah dikembangkan saat ini adalah FWSS.

FWSS adalah kolam atau saluran dengan lapisan dasar *impermiabel* alami maupun buatan berupa tanah liat yang berfungsi untuk mencegah air merembes keluar kolam. Kolam buatan berupa tanah sebagai tempat hidup *emergent plant* dengan kedalaman air berkisar antara 0,1—0,6 m. Pada Tabel 4 berikut ini diuraikan kriteria desain CWs menurut Wood (2001).

Tabel 4: Kriteria Desain Dalam *Constructed Wetland* (CWs)

No	Parameter Desain	Satuan	Tipe	Sistem
			FWS	SSF
1	Waktu detensi	Hari	5—14	2—7
2	BOD <i>loading rate</i>	kg/ha.hari	80	75
3	Kedalaman air	M	0,1—0,5	0,1—1,0
4	<i>Hydraulic loading rate</i> (HLR)	mm/hari	7—60	2—30
5	Panjang : lebar	-	2:1—10:1	3:1—5:1
6	Frekuensi pemanen	Tahun	3—5	3—5

Sumber: Wood (2001).

Menurut Vymazal (2008), tipe lahan basah buatan untuk mengolah air limbah domestik dan perkotaan dapat dilihat pada matriks Tabel 3. Berikut ini akan dijelaskan lebih lanjut tipe lahan basah buatan (CWs).

1). *Sub-Surface Flow System* (SSFS)

Sistem SSFS yakni pengolahan lindi terjadi karena mengalir melalui tanaman yang ditanam pada media berpori. Media yang digunakan tanah, kerikil, dan *gravel* tersusun. Dalam sistem ini tanaman melalui akar dan *rhizoma* yang mentransfer oksigen ke dalam media *subsurface* dan menciptakan kondisi *aerobik*. Proses pengolahan lindi terjadi melalui proses *filtrasi*, *sedimentasi*, *absorpsi* oleh mikroorganisme dan *adsorpsi polutan* oleh tanah (Yuanita, 2003). Berdasarkan tipe pengalirannya *constructed wetland* ada 2 macam yaitu:

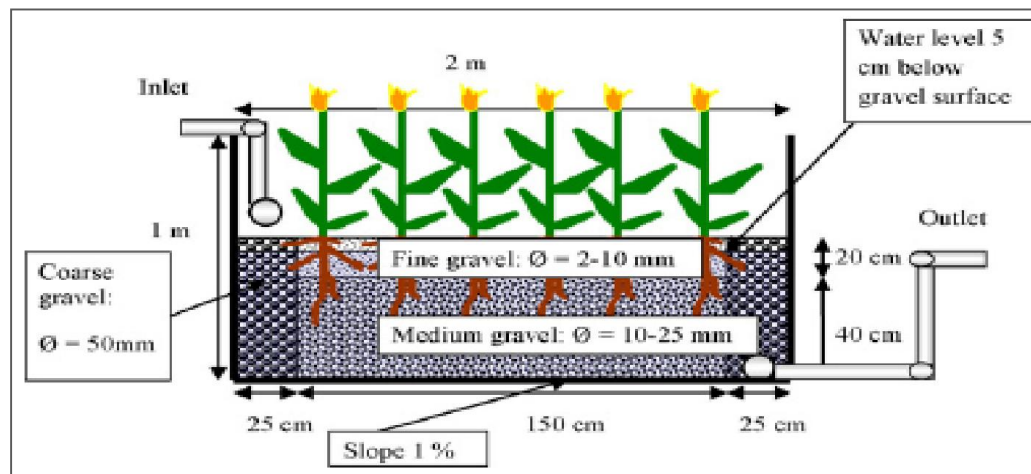
a). Aliran Horisontal

Sistem aliran horisontal air memasuki rawa dari satu titik, kemudian mengalir dalam rawa buatan, dan keluar di ujung rawa. Adapun gambaran SSF *constructed wetland tipe horizontal* (SSF-CWs) dapat dilihat pada Gambar 1. HF-CWs terbagi atas 4 bentuk (Khiauddin, 2003). CWs yang airnya mengalir di atas permukaan media (*Free Water Surface*)

CW yang airnya melewati media tempat tumbuhnya tanaman (*Sub-Surface Flow*). Air limbah mengalir secara horisontal, sehingga pada kondisi ideal tidak terdapat air pada permukaan media. Tipe ini memerlukan *slope* di bagian dasar kolam 1—5 %. Dalam perkembangan teknologi sistem CW, penggunaan CWs pada musim dingin dengan penambahan aerasi dapat berpengaruh terhadap meningkatnya penurunan BOD hingga 97 %, COD sebesar 60 % dan NH_4 berada level 98 % daripada musim panas. Sebaliknya, pada musim dingin tanpa aerasi kecenderungan menurunkan kandungan BOD sebesar 76 %, COD berada level 2 % dan NH_4 sebesar 43 %. Hal ini dikarenakan lapisan media terisolasi tertutup oleh pembekuan suhu sangat dingin, sehingga menurunkan kandungan oksigen yang terperangkap (Nivala *et al.*, 2007).

(1). *Constructed Wetland* (Aliran Horizontal Gambar 1).

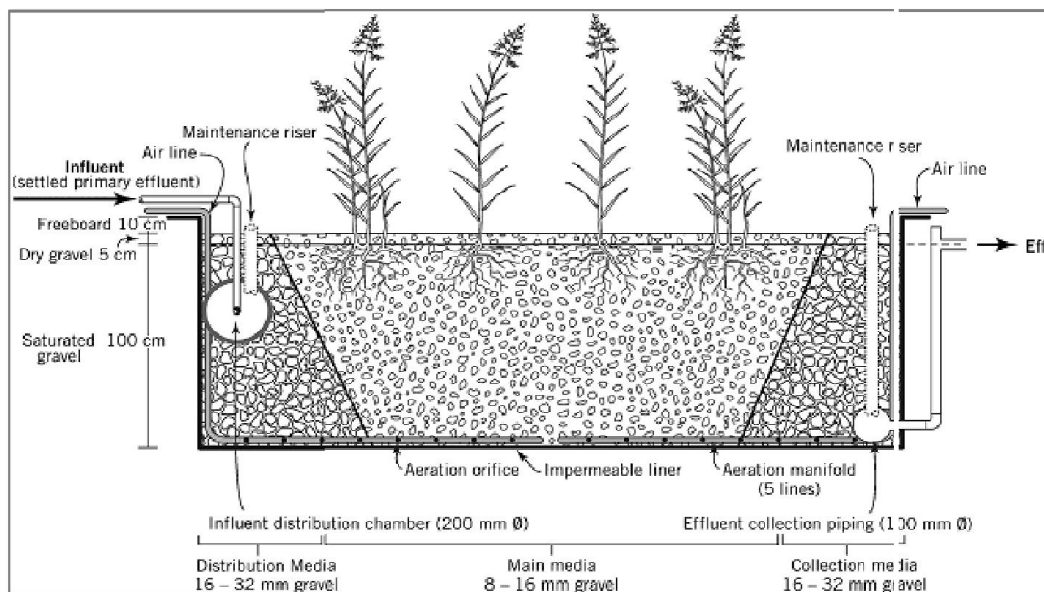
Constructed wetland hidropolik aliran tipis yang menggunakan media tanah atau pasir. Air limbah dialirkan tipis dan permanen di atas permukaan yang agak miring, keras, dan kedap air. Massa akar tanaman akuatik tumbuh dan berkembang di atas permukaan alas yang basah tanpa menembusnya (Gambar 3).



Gambar 1: SSF Constructed Wetland Aliran Horizontal
Sumber: Konnerup *et al.* (2008).

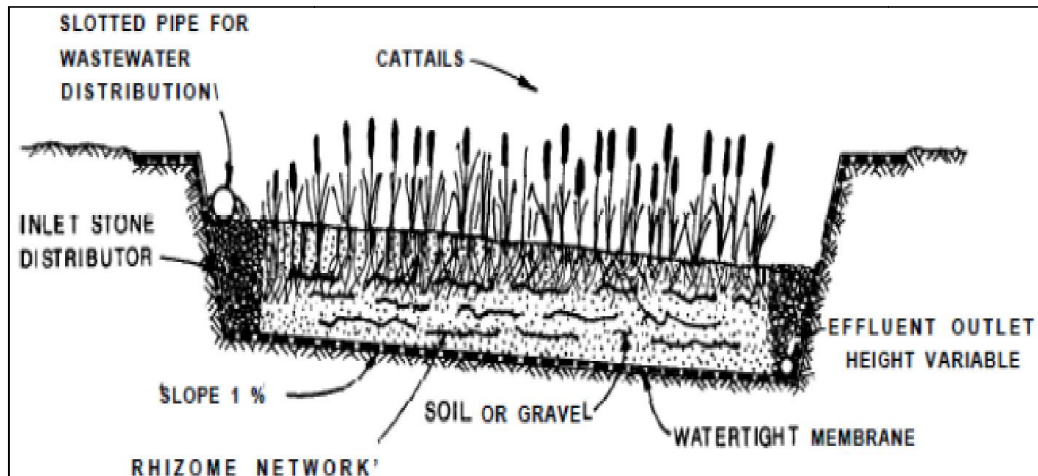
b). Aliran Vertikal (*Down Flow*)

Aliran vertikal (*down flow*) ini bertipe air limbah mengalir secara vertikal baik dari atas ke bawah atau sebaliknya, melewati media untuk keluar dari sistem. Dengan aliran vertikal (*down flow*), air limbah akan tersaring oleh media. Sistem penyaluran air limbah (*outlet*) berada di bagian bawah kolam. Menurut Khiatuddin (2003), aliran vertikal ada dua bentuk yaitu aliran vertikal ke bawah (*downflow*), di mana air limbah dialirkan dari permukaan sistem kemudian merembes melalui media dan keluar melalui *outlet* di bagian bawah kolam (Gambar 4). Pada aliran jenis ini laju aliran dan efek resirkulasi perlu diperhitungkan untuk desain yang tepat sebuah *system* VF-CWs. Laju aliran (HRT) sebesar 40 ml/min dan rasio resirkulasi 1:3 memiliki efisiensi *removal* COD mencapai 96 %, BOD₅ sebesar 92 % dalam 3 hari. Efisiensi penurunan Amonia mencapai 100 % dalam 5 hari dan Posfat total 100 % selama 2 (dua) hari (Lavrova and Koumanova, 2009).



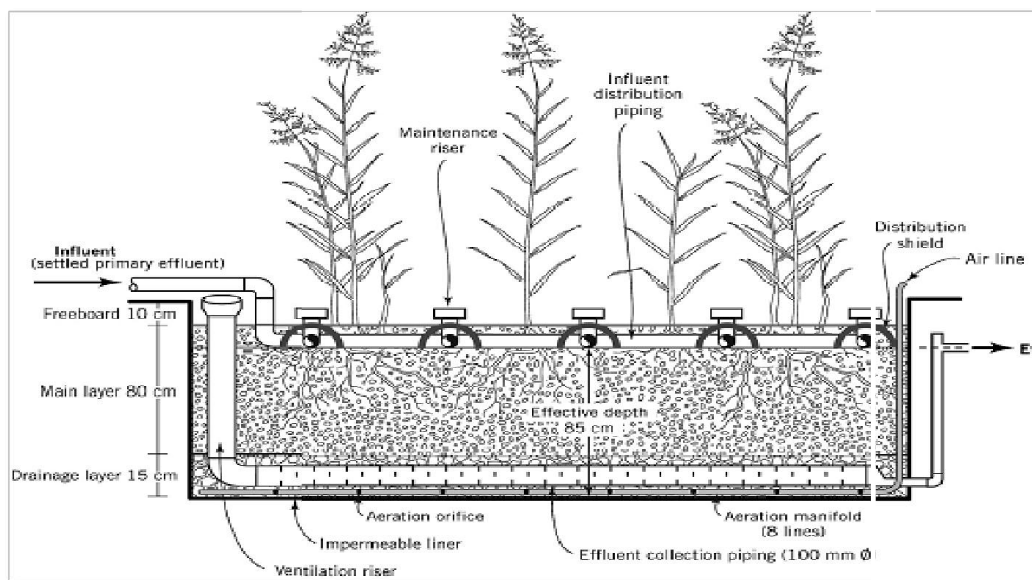
Gambar 2: Constructed Wetland Aliran Atas dan Bawah Tanah

Sumber: Nivala *et al.* (2013)



Gambar 3: Constructed Wetland Hidroponik Aliran Tipis
Sumber: EPA (1998).

Perkembangan selanjutnya, VF-CWs ini menggunakan jenis tanaman *common reeds* (*P.australis*) dan cattails (*T.latifolia*), serta media porous dibedakan menjadi bauksit dan zeolit. Terbukti, hal ini mampu memberikan efek di *effluent*. Unit VFCW cukup efisien dalam *meremoval* bahan organik (BOD_5 dan COD) sebesar 78 % dan nitrogen dengan efisiensi pengolahan sebesar 58 %.

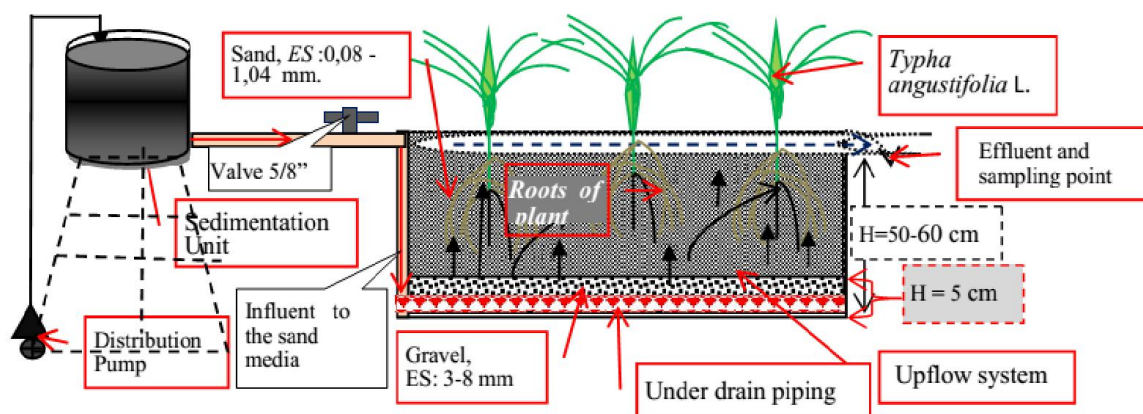


Gambar 4: Constructed Wetland Aliran Vertikal Menurun (Downflow)
Sumber: Nivala *et al.* (2013).

Penurunan fosfor lebih rendah 37 %. Kehadiran akar tanaman dan tabung aerasi dapat memengaruhi pengolahan. Sementara kehadiran alang-alang dan tabung aerasi untuk meningkatkan kinerja, dan spesies tanaman tidak memengaruhi efisiensi removal unsur-unsur tersebut. Hal ini dikarenakan waktu kontak bahan dan limbah terlalu pendek, sehingga tidak direkomendasikan oleh Stevanakis *and* Tsihrintzis (2011).

c). Aliran Vertikal ke Atas (*Upflow*)

Air limbah yang disalurkan melalui pipa dasar di bawah sistem dan naik perlahan melalui media porous lalu ke luar melalui pipa *outlet* di bagian atas reaktor disajikan pada Gambar 5. Menurut Vymazal (2008), berdasarkan tipe lahan basah buatan (CWs) untuk pengolahan air limbah, diuraikan beberapa tipe FWS-CWs, HF-CWs, VF-CWs, FWS, dan lahan basah buatan di beberapa negara disajikan pada Tabel 3.



Gambar 5: Constructed Wetland Aliran Vertikal ke Atas (*Upflow*)

Sumber: Nuradji *et al.* (2015).

Menurut Tchobanoglous *et al.* (1993), ada beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam desain *Sub-surface Constructed Wetland*. Waktu detensi untuk penurunan BOD terdiri atas:

(a). Waktu penahanan (*detention time*) yang dibutuhkan dihitung dengan persamaan berikut.

$$t = \frac{\ln C / \ln Co}{kT} \dots \dots \dots (2.3)$$

Keterangan:

C = konsentrasi *effluent* yang diharapkan (mg/l) kT = koefisien pengaruh temperatur, dihitung dengan formula (2,2)

Co = konsentrasi *influen* (mg/l);

$$K_T = K_{20} 1,06^{(T-20)} \rightarrow K_T = 1,1[1,06]^{(T-20)} \dots \dots \dots (2.4)$$

(b). *Organic Loading Rate* (OLR)

Organik loading rate (OLR) dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$L_{org} = \frac{(C)(dw)(\eta)}{t} \dots \dots \dots (2.5)$$

Keterangan :

C = konsentrasi *influen* (mg/l)

dw = kedalaman aliran (m)

η = porositas

t = waktu *detensi*

(c). Luas Permukaan (A_s)

Luas permukaan media dapat dihitung dengan persamaan (2.6).

$$A_s = \frac{(Q_{ave})(t)}{(\eta)(dw)} \dots \dots \dots (2.6)$$

keterangan:

Q_{ave} = Debit rata-rata *influen* (m³/hr).

dw = kedalaman aliran (m)

η = porositas

t = waktu *detensi*

(d). Aspek Ratio (R_A) dan *Desain Hidraulik*

Dimensi luas permukaan *subsurface constructed wetland* dapat dihitung dengan persamaan (Tchobanoglous *et al.*, 1993) sebagai berikut.

$$A = (Q/R_A)^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (2.7)$$

Keterangan:

w = Lebar reaktor *wetland* (m);

A = Luas permukaan (m^2)

R_A = Aspek ratio, panjang/lebar

Aspek ratio harus dihubungkan dengan hukum Darcy, dengan persamaan (2.7a).

$$A_{cross} = dw \cdot w = \frac{Q}{k \cdot S} \dots \dots \dots (2.7a)$$

Keterangan :

dw = Kedalaman air limbah dalam reaktor (m);

w = lebar reaktor (m)

Q = Q aliran ke sistem (m^3 /hari);

S = kemiringan (*slope*), dengan angka desimal (*headloss*).

k = *hydraulic conductivity*, didapatkan dari tabel tipikal karakteristik media atau hasil analisa (m /hari).

(e). Kedalaman Media

Kedalaman akar 47 mm atau lebih kedalaman air harus direndahkan secara sistem agar pada masa perkembangan tanaman akar dapat berpenetrasi lebih dalam. Akan tetapi, kedalaman air tidak perlu lebih dalam dari pada kedalaman akar.

(f). Porositas

Porositas merupakan persentase volume ruang pori total, yakni volume dari media (tanah/pasir) yang ditempati oleh udara dan air. Untuk menentukan porositas tanah atau media

pasir adalah *cores* pasir ditempatkan pada tempat berisi air sehingga jenuh dan kemudian *cores* ditimbang. Perbedaan berat antara keadaan jenuh dan *cores* yang kering oven merupakan volume ruang pori untuk tanah/pasir. Lebih lanjut, formula untuk menentukan *porositas* media tanah atau pasir menurut (Foth,1998) diperlihatkan pada persamaan (2.8).

$$\text{Porositas} = \frac{\text{Cm}^3 \text{ ruang pori}}{\text{Cm}^3 \text{ volume tanah (media)}} \times 100 \% \dots \dots \dots (2.8)$$

Sedangkan untuk menentukan porositas berdasarkan kerapatan massa (KM) dan kerapatan partikel (KP) mengacu pada persamaan (2.9) dan (2.10).

$$\text{Volume bahan padatan} = \frac{\text{kerapatan massa (KM)}}{\text{kerapatan partikel (KP)}} \times 100 \% \dots \dots \dots (2.9)$$

$$\% \text{ Ruang pori} = 100 \% - \text{Volume bahan padatan} \dots \dots \dots (2.10)$$

(g). Seleksi Media Pasir

Permukaan air bebas pada CWs, media pasir yang mengandung besi, calcium, dan aluminium direkomendasikan. Sedangkan SSHF-CWs tanah atau gravel direkomendasi, Copper *et al.* (1996). Di dalam SSVF-CWs sebuah lapisan pasir aktif sedalam 100 cm, *ES* pada d^{60}_{10} antara (0,25—1,2) mm, serta *UC* kurang dari 3,5 yang direkomendasikan oleh Brix and Arias (2005).

(h). Luas Permukaan Pengolahan dan Kecepatan Beban Organik

FWS-CWs dan SSHF-CWs secara ukuran normal mengikuti persamaan (2.11) sesuai EPA (1988).

$$A_s = [Q (\ln C_o - \ln C_e)] \div (k\tau d n) \quad (3-7) \quad \dots \dots \dots (2.11)$$

Keterangan :

- A : luas *wetland* yang diperlukan (ha); C_e : Konsentrasi *outlet* (mg/L)
 C_i : Konsentrasi *inlet* BOD₅(mg/L); C_e : Konsentrasi *effluent* BOD₅ (mg/L)
 $k\tau$: temperatur rata-rata reaksi orde pertama (d⁻¹); d : kedalam *submenrgen* (m)
 Q : *hydraulic loading rate* (m³/d); C_e : Konsentrasi *outlet* (mg/L)

Tabel 5: Karakteristik Media Pasir yang Digunakan pada Sistem SFS

Tipe Media	Max 10% <i>grain size</i> , (mm)	<i>Porosity</i> , (α)	<i>Hydraulic Conductivity</i> , k_s , m ³ /m ² .hari (k_s)	K ₂₀
<i>Medium sand</i>	1	0,42	420	1,84
<i>Coarse sand</i>	2	0,39	480	1,35
<i>Gravelly sand</i>	8	0,35	500	0,86

Sumber: EPA (1998).

(i). Analisis Efisiensi *Reduksi Constructed Wetland* (CWs)

Analisis efisiensi removal dilakukan untuk mengetahui kemampuan rawa buatan dalam menurunkan kandungan bahan pencemar dalam air lindi limpasan. Analisis ini dilakukan terhadap setiap reaktor yang digunakan pada sistem rawa buatan (Awalina *et al.*, 2011). Efisiensi Penurunan, selisih antara jumlah kandungan zat organik yang keluar di kurangi dengan jumlah kandungan zat organik yang masuk dibagi jumlah zat oganik keluar dikalikan 100 persen. Kadlec *and* Knight (1996) merekomendasikan model *first orde* ($k-C^*$) sebagai fungsi waktu pada penurunan konsentrasi polutan seperti (2.12).

$$\left[\frac{C_t - C^*}{C_0 - C^*} \right] = e^{-kvt} \quad \dots \dots \dots (2.12)$$

Keterangan:

C_t : konsentrasi rata-rata polutan waktu t (mg l^{-1}) C^* : konsentrasi rata-rata polutan (mg l^{-1}),
 C_o : konsentrasi *influent* dari polutan (mg l^{-1}), K_v : konstanta kecepatan penurunan volu-
 t : waktu pengolahan. metric (hari^{-1})

(j). Analisis Efisiensi Media Pasir

Menurut *Kamus Besar Bahasa Indonesia* (Poerwadarminta, 2013), efisiensi yaitu ketepatan cara (usaha, kerja) dalam menjalankan sesuatu (dengan tidak membuang waktu, tenaga, biaya). Efisiensi merupakan suatu ukuran dalam membandingkan rencana penggunaan masukan dengan penggunaan yang direalisasikan, atau perkataan lain penggunaan yang sebenarnya. Efisien harus selalu bersifat kuantitatif dan dapat diukur (*measurable*). Efisiensi adalah perbandingan terbaik antara suatu proses (aksi) dengan hasilnya. Menurut definisi tersebut, efisiensi terdiri atas dua unsur yaitu kegiatan dan hasil dari kegiatan tersebut. Efisiensi adalah perbandingan yang terbaik antara *input* dan *output*.

e. Keunggulan dan Kelemahan Lahan Basah Buatan (CWs)

Lahan basah (*wetland*) aliran permukaan memiliki kebutuhan operasi dan pemeliharaan sedikit, tetapi pemeliharaan harus dilakukan secara benar untuk memastikan kinerja sistem. Operasinya memerlukan kualitas air yang akan dipanen (*effluent*). Beberapa sistem lahan basah memiliki tanggul (*barrier*) yang perlu dipertahankan, dan struktur *inlet* dan *outlet* yang seharusnya dibersihkan secara berkala. Hasil penelitian yang dilakukan oleh Trotta *et al.* (2002); Viskari (2009); Nayono (2006); dan Hammer (1993) menunjukkan bahwa keunggulan dan kelemahan CWs disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6: Keunggulan dan Kelemahan Lahan Basah Buatan (CWs)

No	Keunggulan	Kekurangan
1	Lahan basah buatan umumnya lebih murah dioperasikan dan mudah dalam pemeliharaan, (Li, 2009; Hammer, 1993).	Lahan basah buatan membutuhkan luas lahan lebih dari pada jenis pilihan pengolahan lainnya.
2	Lahan basah buatan membutuhkan energi sedikit untuk operasionalnya. (Li, 2009).	Lahan basah buatan aliran permukaan dapat menarik nyamuk dan agen penyakit lainnya untuk berkembang biak di dalamnya (Nayono, 2006).
3	Lahan basah buatan dapat memberikan yang lebih efektif menurunkan bahan pencemar untuk pengolahan lanjutan (Li, 2009).	Lahan basah yang tidak sesuai untuk mengolah beberapa limbah cair dengan konsentrasi polutan tinggi.
4	Lahan basah buatan dapat menyediakan habitat tambahan untuk satwa liar, Nayono (2006).	Kinerja lahan basah dapat bervariasi berdasarkan penggunaan dan kondisi iklim. Mungkin ada awal berkepanjangan <i>start-up</i> periode sebelum vegetasi memadai untuk didirikan.
5	Lahan basah dapat memberikan tambahan estetika rumah dan rona lingkungan, (Li, 2009)	Dimungkinkan terdapat timbulnya bau yang kurang sedap disekitar lahan basah.
6	Lahan basah dipandang sebagai teknologi ramah lingkungan dan umumnya diterima dengan baik oleh publik.	Adanya kehilangan air karena proses penguapan (Nayono, 2006).
7	Lahan basah dapat mengurangi resiko kesehatan manusia atau pada lingkungan (Li, 2009).	
8	Sistem lahan basah secara ideal memberikan beberapa konsep lingkungan baru kepada manusia ketika teknologi pengolahan ini dikembangkan sebagai sumber dan kebutuhan lingkungan yang alamiah (Viskari, 2009).	

Sumber: Trotta *et al.* (2002); Viskari (2009); Nayono (2006); Hammer (1993); Li (2009).

f. Peran Lahan Basah dalam Menyerap Polutan

Menurut MetCalf and Eddy (1993), proses pengolahan limbah pada CWs aliran bawah permukaan (SSF-CWs) dapat terjadi secara fisik, kimia, maupun biologi. Proses secara fisik yang terjadi adalah proses *sedimentasi*, *filtrasi*, *adsorpsi* oleh media tanah yang ada. Wood (2001) mengatakan proses secara fisik ini hanya dapat mengurangi konsentrasi TDS. COD dan BOD terlarut dapat dihilangkan dengan proses gabungan kimia dan biologi melalui aktivitas mikroorganisme maupun tanaman.

Menurut EPA (1998), mekanisme penurunan bahan pencemar baik secara fisik, kimia, dan biologi di dalam air limbah pada lahan basah akan dijelaskan secara matriks pada Tabel 7.

Tabel 7: Mekanisme Penurunan Bahan Pencemar Air Limbah pada Lahan Basah

Mekanisme	Pengaruh Bahan Pencemar ^(a)								Deskripsi
	TDS	TSS	BOD	N	P	Logam berat	Orga nik	Bakteri - virus	
Fisik :									
Sedimentasi	<i>p</i>	<i>s</i>	<i>i</i>	<i>i</i>	<i>i</i>	<i>I</i>	<i>i</i>	<i>i</i>	Pengendapan secara gravitasi dari padatan dan bahan pencemar sejenis di dalam unit pengendap.
Filtrasi	<i>s</i>	<i>s</i>	<i>p</i>						Parikel-partikel disaring secara mekanis sebagai <i>substrat</i> air terakhir, di sejumlah akar.
Absorpsi		<i>s</i>							Terjadi gaya atraktif antar partikel (<i>gaya vander Wall</i>).
Kimia :									
Presipitasi				<i>p</i>	<i>p</i>				Terbentuk <i>copresifitasi</i> dengan bahan campuran yang tidak mudah larut.
Adsorpsi				<i>p</i>	<i>p</i>	<i>S</i>			Penyerapan pada permukaan <i>substrat</i> dan tanaman.
Dekomposisi						<i>P</i>		<i>p</i>	Terjadi penguraian atau perubahan sejumlah dari bahan campuran oleh fenomena dari radiasi UV, oksidasi dan reduksi.
Biologi :									
Metabolism ^(b) oleh bakteri		<i>p</i>	<i>p</i>	<i>p</i>				<i>p</i>	Penurunan padatan koloid, padatan terendap dan padatan terlarut, tekanan tanaman, bakteri <i>netrifikasi</i> dan <i>denitrifikasi</i> .
Metabolism ^(b) oleh tanaman								<i>s</i> <i>s</i>	Pengambilan dan penguraian bahan organik oleh tanaman, dikeluarkan oleh akar bagi yang toksis.
Absorpsi oleh tanaman			<i>p</i>	<i>s</i>	<i>s</i>	<i>S</i>		<i>s</i>	Kondisi tidak layak jumlahnya signifikan dengan kontaminan yang akan diserap oleh tanaman.
Pengaruh oleh alam								<i>p</i>	Kerusakan alam oleh organisme pada lingkungan yang kurang menguntungkan.

Sumber: EPA (1998).

Keterangan Tabel 7: (a) *p*: efek primer; *s*: efek sekunder; *i*: efek tambahan (terjadi efek penurunan rendah seketika dari kontaminan lain); dan (b) Metabolisme massa termasuk kedua reaksi *biosintesis* dan *katabolisme*.

g. Faktor yang Memengaruhi Kinerja *Wetland*

Sistem *wetland* melakukan pengolahan melalui metabolisme bakteri dan *sedimentasi* fisik seperti pada sistem pengolahan konvensional. Perbedaan yang mendasar antara pengolahan konvensional dan sistem *wetland* adalah pada sistem pengolahan konvensional, air limbah diolah secara cepat dengan energi tinggi, serta lingkungan yang intensif (dalam reaktor). Sedangkan pada sistem pengolahan *wetland* pengolahan terjadi secara lambat (*slow rate*) dan umumnya dalam lingkungan ekologi yang tidak dikontrol. Berikut ini faktor-faktor yang dapat memengaruhi kinerja pengolahan air limbah baik pada sistem *wetland*.

1). Tanaman

Tanaman berfungsi sebagai permukaan tumbuh bakteri, membantu proses filtrasi bahan padat, dan memperbaiki *permeabilitas*. Tanaman mampu meningkatkan *porositas*, sehingga mampu menstabilkan *permeabilitas* hidraulik. Tanaman juga berfungsi sebagai pengatur *evapotranspirasi* pada *wetland*. Tanaman juga berperan dalam translokasi oksigen ke zona akar. Tumbuhan air mempunyai sistem akar *rizhosphere* yang mengandung saluran udara tebal tempat ujung akar rambut menggantung dan cabang yang tumbuh vertikal ke atas (Mukhlis, 2007). Tanaman menyerap O₂ yang ada di udara melalui daun dan diteruskan ke batang dan akar (*rizhoma*).

Keberadaan O₂ di sekitar akar *rizhosphere* menstimulasi pertumbuhan bakteri aerobik di dalam air dan media terutama di daerah sekitar akar. Tanaman juga dapat menjadi sumber

karbon bagi mikroorganisme dalam *wetland*. Akar tanaman mampu menyerap nutrisi yang terdapat dalam air limbah sebagai unsur hara. Tanaman memperbesar area permukaan untuk pertumbuhan mikroorganisme baik pada akar, *rizhoma*, batang atau daun, serta sebagai penyekat permukaan *bed*. Sistem pengolahan limbah skala kecil, misalnya rumah tangga *makrophyte* dapat memberikan peran lebih. Sangat dimungkinkan untuk menggunakan tanaman *wetland* yang indah seperti *yellowflag (pseudacorus)* dan *Canna-lilies*. Dengan cara ini, sistem pengolahan air limbah akan menyenangkan secara estetika (Ayaz and Akca, 2000).

2). Media

Media adalah tempat bagi organisme untuk melekat dan sebagai media bagi tanaman, serta berperan langsung dalam purifikasi air limbah melalui proses fisika dan kimia. Media pasir memengaruhi waktu *detensi* air limbah dalam *wetland*, kesempatan untuk organisme melakukan kontak dengan air limbah dan ketersediaan oksigen serta faktor-faktor yang berhubungan langsung dengan kemampuan pengolahan (Wood, 2001).

3). Mikroorganisme

Mikroorganisme yang melekat pada batuan dan akar *macrophytes* atau hidup dalam air berperan dalam penguraian bahan organik air limbah, baik secara *aerobik* maupun *anaerobik*. Aktivitas makroorganisme dalam *wetland* dapat disamakan dengan aktivitas mikroorganisme dalam pengolahan konvensional (lumpur aktif) dan *trickling filter*. Tumbuhan menyediakan media penyangga bagi bakteri pengurai zat organik yang tumbuh melekat. Tumbuhan juga berfungsi untuk menyediakan komponen lingkungan perairan yang dapat meningkatkan efisiensi pengolahan. Menurut Polprasert (1996), jenis mikroorganisme dalam reaktor tumbuhan air lebih banyak daripada pengolahan *activated sludge* dan *trickling filter*. Dalam tanah suhu normal terdapat 10—100 juta bakteri setiap gram tanah. Angka ini mungkin

meningkat bergantung dari kandungan bahan organik suatu tanah atau air limbah (Mukhlis, 2007).

4). Tanaman Air

Tanaman air (*makrofita*) yang hidup pada *wetland* memberikan keuntungan, di antaranya menyumbang produktivitas dan menyediakan media untuk pertumbuhan mikroorganisme dan membantu siklus nutrien akumulasi di dalam sedimen. Kaitannya dengan fungsi *wetland* sebagai pengolahan limbah, *makrofita* berperan penting dalam menyediakan tempat untuk menempelnya mikroba pengurai limbah. Fungsi lain dari *makrofita* adalah menstabilkan *substrat* sehingga polutan yang terperangkap dalam *wetland* dapat diendapkan (Fitriarini, 2002).

Oksigen tersebut mengalir ke akar melalui batang setelah berdifusi dari atmosfer melalui pori-pori daun (Khatuddin, 2003). Pelepasan O₂ oleh akar tanaman rawa menyebabkan air/tanah di sekitar rambut akar memiliki kadar oksigen terlarut yang lebih tinggi dibandingkan dengan air/tanah yang tidak ditumbuhi tanaman air, sehingga memungkinkan organisme pengurai seperti bakteri aerob dapat hidup dalam lingkungan rawa yang berkondisi anaerob. *Rhizosphere* (lingkungan sekitar perakaran) merupakan bagian tanah di mana populasi mikroba berubah jumlah dan mutunya karena adanya akar tanaman. Akar-akar tanaman mengeluarkan sejumlah besar zat organik. Pengelupasan kulit akar memberi banyak bahan organik baru. Zat-zat ini merupakan makanan untuk mikroorganisme dan menyebabkan lingkungan aktivitas biologi dekat akar menjadi kuat. Berbagai macam organisme menempati *rhizosphere*, sebagian besar adalah bakteri menguntungkan. Koloni bakteri terdapat dalam bentuk lapisan tipis yang selalu ada di sekitar akar (Campbell and Ogden, 1999). Peranan *makrofita* pada pengolahan sistem CWs disajikan pada Tabel 8.

Jenis tanaman yang timbul (*emergent species*) umumnya dapat bertahan pada kedalaman air 15—61 cm dan dapat dipakai untuk *wetland* aliran permukaan maupun aliran *subsurface*. Tanaman tersebut memiliki perakaran yang menyebar secara lateral atau horisontal dan vertikal, karena semakin dalam akar masuk, maka kontak dengan mikroorganisme makin besar dan meningkatkan oksigen pada zona akar yang *anaerob*. Tanaman tersebut berkembangbiak dengan cepat. Tanaman tersebut sesuai dengan keadaan setempat.

Tabel 8: Peran Makrofita dalam Pengolahan Sistem *Constructed Wetland*

No	Bagian Makrofita	Peran di Dalam Proses Pengolahan Limbah
1	Jaringan Tumbuhan	Mengurangi kecepatan angin (mengurangi resiko resuspensi), menyimpan nutrisi dan efek filtrasi.
2	Jaringan tumbuhan di dalam air	Mengurangi kecepatan arus air (meningkatkan proses sedimentasi, mengurangi resiko <i>resuspensi</i>), menyediakan <i>area attached biofilm</i> , dan pengambilan nutrisi.
		Peran di dalam proses pengolahan, menstabilkan permukaan sedimen, dan mencegah terjadinya <i>clogging (vertical flow system)</i> .
3	Akar dan rizoma pada sedimen	Pengambilan <i>nutrien</i> dan pengambilan oksigen

Sumber: Brix and Schierup (1990).

Beberapa jenis tanaman yang biasa dipakai dalam *constructed wetland* adalah *common umbrella plant (P. australis)* dan *umbrella plantmace (T. latifolia)*. Dua tanaman ini memiliki biomassa yang besar yaitu bagian atas (daun) dan bagian bawah (sistem perakaran) permukaan tanah atau media. Jaringan tanaman *subsurface* tumbuh secara horisontal dan vertikal, sehingga menciptakan matriks ekstensif yang mampu mengikat partikel tanah dan memiliki luas permukaan besar yang mampu mengambil nutrisi dan ion (Shutes, 2001). Tanner (2000)

menyatakan kesetimbangan massa pada *wetland* media kerikil pada horisontal aliran permukaan bawah antara yang ditanami dengan yang tidak ditanami menunjukkan *wetland* yang ditanami meningkatkan penurunan konsentrasi nitrogen dan fosfor, membantu desinfeksi, namun tidak ada perbedaan untuk penurunan konsentrasi BOD dan SS. Sementara itu, Ayaz *and* Akca (2000) menyatakan tidak ada perbedaan yang tajam saat pengamatan efisiensi penurunan konsentrasi COD, TOC, TSS, nitrogen, dan fosfor antara reaktor yang di tanaman dengan reaktor tanpa tanaman pada media kerikil berdiameter 0—30 mm.

Tanaman dominan digunakan dalam CWs seperti rumput gajah (*Scirpus*), spikerush (*Eleocharis*), teki tahunan (*Cyperus*), Bergegas (*Juncus*), umum buluh (*Phragmites*), dan tanaman rawa (*Typha*). Tidak semua spesies tanaman cocok digunakan sebagai EWs untuk pengolahan limbah yang mampu mentolerir kombinasi air tergenang dan paparan limbah aliran yang mengandung konsentrasi yang relatif tinggi. Tanaman pada lahan basah berfungsi sebagai komponen penting dari EWs. Tanaman berkontribusi mengangkat kontaminan dengan mengubah sistem hidrologi, mengeksekusi partikulat, dan menghimpun polutan. Proses-proses ini dapat digunakan untuk merancang EWs dengan sejumlah pendekatan pengolahan, terutama pada *phytoextraction*, *rhizofiltration*, dan *phytostabilization* (Zhang *et al.*, 2010).

Haberl *and* Langergraber (2002) menegaskan proses eliminasi polutan (termasuk logam berat) dalam air limbah terjadi melalui proses secara fisik, kimia, dan biologi yang cukup kompleks. Di dalamnya terdapat interaksi dan asosiasi antara media, tumbuhan *makrophyta*, dan mikroorganisme. Interaksi dan asosiasi tersebut berupa pengendapan untuk zat padatan tersuspensi; filtrasi dan presipitasi kimia pada media; transformasi secara kimia, adsorpsi dan pertukaran ion dalam permukaan tanaman maupun media; transformasi dan

penurunan polutan maupun nutrient oleh mikroorganisme maupun tanaman, dan mengurangi mikroorganisme pathogen.

Halverson (2004) menyebutkan polutan di dalam lahan basah buatan secara umum penyerapannya melalui proses abiotik (fisik dan kimia) atau biotik (mikrobia dan tanaman) dan gabungan dua proses tersebut. Menurut Walker *and* Hurl (2002), proses pengolahan awal (primer) secara abiotik dapat dilakukan melalui beberapa cara berikut. Pertama, *settling* dan *sedimentasi*, efektif untuk menghilangkan partikulat dan padatan tersuspensi. Kedua, *adsorpsi* dan *absorpsi*, merupakan proses kimiawi yang terjadi pada tanaman, substrat, sediment maupun air limbah, yang berkaitan erat dengan waktu retensi air limbah. Ketiga, *oksidasi* dan *reduksi*, efektif untuk mengikat logam-logam b_3 dalam lahan basah buatan. Keempat, *photodegradasi*, degradasi (penurunan) berbagai unsur polutan yang berkaitan dengan adanya sinar matahari. Kelima, *volatilisasi*, yakni penurunan polutan akibat menguap dalam bentuk gas.

Peran mekanisme *phytoremediation* di depan merupakan putaran yang sangat penting dan lebih tepat untuk zat organik tinggi (Walker *and* Hurl, 2002). Menurut Preussler *et al.* (2014), metode *Phytoremediation* yang telah disampaikan di depan dapat digunakan sebagai *fythotechnology* akhir dalam pengolahan limbah *landfill* dengan memanfaatkan *macrophyta* sebagai kontrol di effluent sistem lahan basah alami maupun buatan. Lahan basah memindahkan polutan dari perairan melibatkan proses yang kompleks antara aspek biologi, fisika, dan kimia. Pengambilan nutrient oleh tumbuhan tingkat tinggi dan penyimpanan logam berat di dalam akar adalah komponen biologi yang paling nyata pada ekosistem lahan basah. Bakteri bertransformasi dalam pengambilan polutan oleh tumbuhan. Selanjutnya, proses

fisika-kimia termasuk *adsorpsi*, *presipitasi*, dan *sedimentasi* di dalam tanah dan *rhizosphere* di zona akar sebagai mekanisme utama untuk pengangkatan bahan pencemar.

Proses secara biotik, seperti *biodegradasi* dan penyerapan oleh tanaman juga merupakan bentuk pengurangan polutan seperti halnya pada proses abiotik. Menurut penelitian yang dilakukan oleh USEPA (1998; 2000); Morikawa *and* Erkin (2003); Zhang *et al.* (2010); dan Adki *et al.* (2014), mekanisme penyerapan polutan dengan cara *Phytoremediation* disajikan dalam bentuk matriks pada Tabel 9.

Tabel 9 : Mekanisme *Phytoremediation* dalam Penyerapan Polutan

<i>Phytoremediation</i>	Mekanisme
<i>Phytostabilization</i>	akar tumbuhan melakukan <i>imobilisasi</i> polutan dengan cara mengakumulasi, mengadsorpsi pada permukaan akar dan mengendapkan presipitat polutan di zona akar.
<i>Rhizodegradation</i>	Proses ini organ tumbuhan menguraikan polutan yang diserap melalui proses metabolisme tumbuhan atau secara enzimatik. Proses itu lebih tepat untuk limbah dengan kandungan zat organik tinggi.
<i>Phytoextraction</i>	Tumbuhan menyerap polutan dan selanjutnya di translokasi ke organ tumbuhan. Proses menggunakan tumbuhan secara alamiah menyerap dan menghimpun tingkat kontaminan yang sangat tinggi ke dalam sistem akar, batang dan daun dan kemudian dipanen keseluruhannya.
<i>Phytodegradation</i>	Proses ini organ tumbuhan menguraikan polutan yang diserap melalui proses metabolisme tumbuhan atau secara enzimatik. Proses itu lebih tepat untuk limbah dengan kandungan zat organik tinggi.
<i>Phytovolatilization</i>	Penyerapan polutan oleh tumbuhan dan di keluarkan dalam bentuk uap air ke atmosfer, sehingga kontaminan mengalami transformasi sebelum lepas ke atmosfer.
<i>Evapotranspiration</i>	Merupakan efek kombinasi penguapan air oleh permukaan daun dengan penguapan air oleh stomata.
<i>Rhizofiltration</i>	Akar tumbuhan mengadsorpsi larutan polutan sekitar akar ke dalam akar. Proses ini lebih cocok untuk bahan larutan sehingga tepat diterapkan untuk perbaikan kualitas air limbah atau perairan tercemar

D. Kebutuhan Unsur Hara untuk Tanaman Air

Tumbuhan memerlukan 16 unsur hara yang dibedakan menjadi enam unsur makro dan delapan unsur mikro. Karbon, Hidrogen, dan Oksigen bergabung dengan reaksi fotosintesis yang diperoleh dari udara dan air. Menurut Foth (1998) unsur hara makro diperlukan relatif besar, biasanya di atas 500 ppm, sedang unsur mikro diperlukan dalam jumlah sangat kecil, biasanya kurang dari 50 ppm dalam tanaman. Unsur-unsur tersebut dan peranannya dalam tanaman sangat esensial. Unsur hara *makro*, meliputi Belerang (S), Phosphor (P), Kalium (K), Kalsium (Ca), Magnesium (Mg), dan Nitrogen (N). Kandungan *nutrisi mikro* di dalam tanaman harus di bawah ambang batas, agar tidak beracun bagi makhluk lainnya. Menurut Sasmaz *et al.* (2008), logam berat Pb dewasa ini perlu mendapat perhatian serius yaitu sebagai polutan kimia utama lingkungan dan sebagai unsur yang merupakan racun bagi tanaman. Markert (1992) meliris jika konsentrasi Pb dalam tanaman lebih tinggi dari rata-rata konsentrasi di dalam tanah, maka merupakan *phytotoxic* (apabila lebih dari 5 mg/kg). Selanjutnya, Kabata-Pendias *and* Pendias (2001) meliris kandungan logam berat pada jaringan tanaman normal untuk kandungan Pb antara 3—20 mg/kg.

Fotosintesis merupakan proses perubahan bahan-bahan anorganik seperti CO₂ dan H₂O oleh klorofil diubah menjadi karbohidrat atas pertolongan sinar matahari. Fotosintesis dipandang juga sebagai proses di mana energi matahari diubah menjadi energi kimia yang berupa karbohidrat dan dinyatakan dalam bentuk hasil bahan kering total tumbuhan.

Penyerapan unsur hara oleh tumbuhan air dilakukan oleh akar, daun, dan batang. Tumbuhan dapat mengabsorpsi unsur hara, jika unsur hara tersebut terdapat pada permukaan akar. Pergerakan unsur hara menurut Foth (1998), meliputi penyerapan air atau intersepsi, aliran massa, proses difusi.

1. Penyerapan Akar (*Intersepsi*)

Intersepsi merupakan pertukaran langsung antara unsur hara dengan akar, sehingga semakin banyak akar yang bersentuhan dengan unsur hara, maka semakin banyak unsur hara yang dapat diserap akar. Akar tumbuhan akan berkembang dan menuju tempat yang lebih jauh di dalam tanah. Perpanjangan akar-akar tumbuhan berarti memperpendek jarak yang harus ditempuh oleh unsur hara untuk mendekati akar tumbuhan melalui aliran massa ataupun *difusi*.

2. Aliran Massa

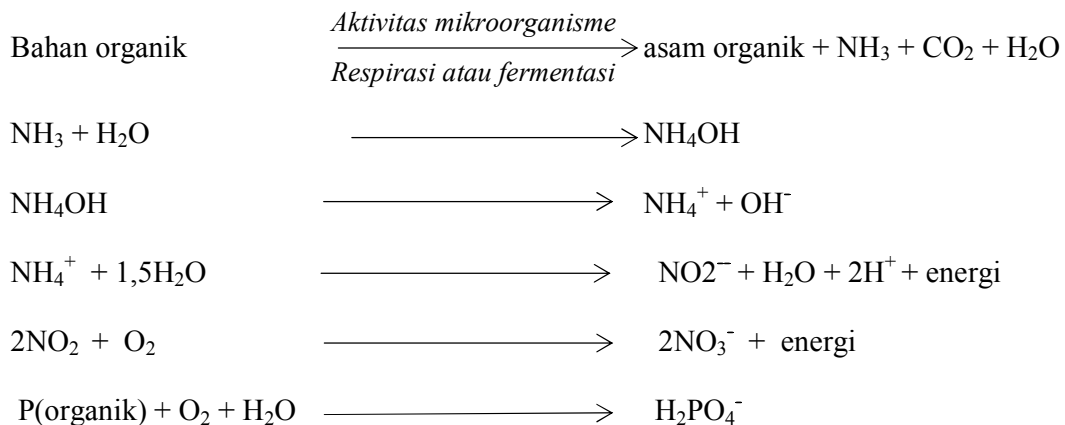
Aliran massa dalam air bergerak masuk menembus tanah menuju akar, ke gradien potensial yang disebabkan oleh transpirasi (Fitter *and* Hay, 1994). Aliran massa diartikan sebagai gerakan unsur hara di dalam tanah, menuju permukaan akar tumbuhan bersama-sama massa gerakan air. Gerakan massa air di dalam tanah menuju permukaan akar berlangsung secara menerus karena air yang diserap akan menguap. Waktu yang bersamaan unsur hara akan terangkut bersama ion-ion yang larut dari daerah yang jauh menuju daerah yang dekat dengan akar.

3. Proses *Difusi*

Hukum *difusi* menyatakan bergeraknya zat dari konsentrasi tinggi ke tempat dengan konsentrasi rendah. Sehingga mekanisme *difusi* terjadi karena selisih konsentrasi yang terdapat pada akar. Selanjutnya, unsur hara akan terdifusi ke daerah ini. *Difusi* akan terjadi pada selaput air yang ada, sehingga kecepatan *difusi* bergantung pada kadar air dalam tanah (Foth, 1998).

Secara umum, prinsip pengolahan air limbah menggunakan tumbuhan air (*makrofita*) adalah pemanfaatan simbiosis mikroorganisme dalam tanah dan tumbuhan air. Bakteri

menguraikan bahan organik menjadi molekul atau ion yang dapat diserap oleh tumbuhan. Hal ini dapat memacu mempercepat proses penguraian bahan organik. Proses penyerapan ion-ion oleh tumbuhan air akan mencegah terjadinya penumpukan ion-ion yang bersifat racun bagi bakteri. Dalam sistem *wetland* bahan organik yang terendapkan dihilangkan dengan proses sedimentasi dan penguraian *anaerobik* di dasar *wetland*.



Hasil dari reaksi-reaksi tersebut di depan adalah ion-ion seperti NH₄⁺, NO₃⁻, H₂PO₄⁻ menjadi bentuk yang dapat diserap oleh tumbuhan air. Menurut Kampman *et al.* (2012), proses penguraian bahan organik menghasilkan asam-asam organik dan CO₂, kemudian terjadi proses *absorpsi* oleh tumbuhan air melalui akar setelah terbentuk ion. Contohnya adalah ion asetat dan ion karbonat.

E. Peran Tanaman *T.angustifolia* L dan Perkembangannya

1. Tanaman *T. angustifolia* L

Tanaman *T. angustifolia* L adalah salah satu **tumbuhan yang hidup di rawa**. **Tanaman ini tumbuh di daerah yang berlumpur dan memiliki air yang cukup**. *T.angustifolia* L (daun *Cattail*) merupakan tanaman eksotis invasif di Amerika Utara yang

sering membentuk monokultur di lahan basah dan lebih invasif dibandingkan anggota asli dari genusnya (Jarchow and Cook, 2009). Tanaman *T.angustifolia* L merupakan jenis spesies daun sempit panjang dan kedalaman air maksimum 12 *inchi* masih dapat ditoleransi, sangat agresif, serta toleran pada air payau dengan pH antara 3,7—8,5. Tidak direkomendasikan untuk air semburan, karena sangat tinggi invasinya (Zhang *et al.*, 2010). Kepala bunga berbentuk seperti silinder memanjang, adalah lonjakan kompak di ujung terminal dari batang 1—3 meter. Lonjakan bunga tersebut dibagi menjadi dua bagian mudah yakni *pistillate flowers* membentuk klub coklat mencolok terletak di bawah puncak menara kuning (bunga jantan). Daun berasal dari pangkal batang dan menyebar keluar saat mereka naik ke udara. Di bawah tanah terdapat rimpang tepung jangkar tanaman ke tanah (Ling, 2010). Umumnya tumbuh di daerah air dan becek seperti kolam, pinggiran saluran, bahkan daerah air rawa di bagian dalam dan payau, (Lim *et al.*, 1998).

Tumbuhan ini dapat ditemukan pada ketinggian 0—1500 m dari permukaan laut. Penyebarannya di Jawa (kota Surabaya, Kecamatan Waru Sidoarjo, kota Semarang, dan kota Lamongan), Madura, Bawean, Karimunjawa, Kota Palu (Sulawesi Tengah), serta pulau-pulau lainnya. Umumnya tumbuhan ini banyak dimanfaatkan sebagai tanaman hias. Menurut Vymazal (2013), anggota famili *Typhacea* sebanyak 6 spesies. Spesies *T.angustifolia* L merupakan salah satu spesies tanaman *emergen* yang digunakan pada lahan basah buatan aliran permukaan.

Barus (1990) merilis tanaman *T.angustifolia* L tergolong spesies daun sempit yang termasuk kelompok tanaman gulma. Gulma adalah sebagai tumbuhan yang tumbuh pada areal yang tidak dikehendaki tumbuh pada areal pertanaman. Gulma secara langsung maupun tidak langsung merugikan tanaman budidaya. Pengenalan suatu jenis gulma dapat dilakukan dengan

melihat keadaan morfologinya, habitatnya, dan bentuk pertumbuhannya. Gulma dapat menyebabkan kerugian pada berbagai bidang kehidupan. Pada bidang pertanian, gulma dapat menurunkan kuantitas hasil tanaman. Penurunan kuantitas hasil tersebut disebabkan oleh adanya kompetisi gulma dengan tanaman dalam memperebutkan air tanah, cahaya matahari, unsur hara, ruang tumbuh, dan udara yang menyebabkan pertumbuhan tanaman terhambat.

Menurut Jachow and Cook (2009), *T.angustifolia* L (daun sempit) memiliki *allelopathy* yang diproduksi di akar lebih kuat dibandingkan *B. fluviatilis*. Kandungan *allelopathy* pada gulma juga dapat menekan pertumbuhan tanaman utama. *Allelopathy* adalah *substansi* (zat) yang diproduksi oleh suatu tanaman yang merugikan tanaman lain (Muller, 1970); atau bagi mikroba menurut Rice (1974) dan Fitter and Hay (1994).

Hasil *determinasi* tanaman dengan Genus: *Typha*, Spesies: *Typha angustifolia* L (tifa). *T.angustifolia* L adalah tanaman herba semusim. Daunnya pipih, sempit, panjang, dan berwarna hijau tua. Karangan bunga dalam tangkai yang sangat panjang, dengan kumpulan bunga jantan di bagian ujung, dan kumpulan bunga betina yang terletak di bawah kumpulan bunga jantan. Umumnya, tanaman ini berkembang biak secara vegetatif. Kumpulan bunga betina tampak seperti sosis berwarna coklat (Miklovic, 2000). Menurut Khitudin (1993), *T. angustifolia* L merupakan tanaman yang mencuat ke permukaan air, di mana merupakan tanaman air yang memiliki sistem perakaran pada tanah di dasar perairan dan daun berada jauh di atas permukaan air. Rimpang (*rhizome*) tanaman *T.angustifolia* L tidak berbentuk umbi. Sistem akar serabut dan pada ujung akarnya terdapat rambut akar. Sistem penyebaran ke arah samping dengan ditandai cabang tunas baru yang ada di sisi rimpang berupa *stolon*. *Stolon* tumbuh di sisi rimpang yang menjalar mendatar dan dari ujungnya dapat tumbuh sebagai tumbuhan baru (Tjitrosoepomo, 2000). *T.angustifolia* L merupakan spesies tanaman yang

sangat toleran pada kondisi kadar salinitas tinggi (Miklovic, 2000). Hasil determinasi tanaman *T.angustifolia* L disajikan pada bagian selanjutnya.

Kingdom : Plantae

Subkingdom : Tracheobionta (tumbuhan berpembuluh)

Super divisi : Spermatophyta (menghasilkan biji)

Divisi : Magnoliophyta (tumbuhan berbunga)

Kelas : Monocotyledoneae (berkeping satu)

Ordo : Poales

Famili : Typhaceae

Genus : *Typha*

Spesies : *Typha_angustifolia* L (tifa)



Gambar 5a: Spesies *T. angustifolia* L

2. Perkembangan Tanaman *T.angustifolia* L

Menurut Vymazal (2013), *T. angustifolia* L merupakan salah satu dari 150 spesies tanaman yang frekuensinya lebih umum digunakan pada 643 FWS-CWs jenis (*Narrow-leaved-cattail*) di 43 negara. Spesies *T.angustifolia* L terdistribusi di Asia sebanyak 16, Eropa terdapat sebanyak 5, Amerika Utara sebanyak 42, Pusat dan Amerika Selatan sebanyak 2.

Menurut Shubiao *et al.* (2014), ada beberapa faktor umum yang memengaruhi langsung dan/atau tidak langsung terhadap penurunan secara intensif material organik di dalam CWs di antaranya suhu, tipe material padatan, strategi, dan kondisi kolam CWs. Beberapa penelitian berkaitan dengan faktor-faktor yang berpengaruh dan keberhasilan di dalam sistem CWs secara ringkas disajikan dalam keterangan berikut.

- a. Resirkulasi untuk meningkatkan kinerja penurunan di CWs bergantung banyak faktor, misalnya jenis dan beban *influen* CWs (Sun *et al.*, 2003; Arias *et al.*, 2005; Shubiao *et al.*, 2014). Kebanyakan aliran vertikal dan integrasi CWs, resirkulasi limbah dapat meningkatkan interaksi antara polutan dan mikroorganisme, yang menghasilkan efek positif pada kinerja pengolahan, terutama pada penurunan secara efektif kandungan TN. Dalam CWs aliran horisontal dengan kondisi jenuh, resirkulasi limbah *effluent* dapat menyebabkan masalah mengingat peningkatan HLR. Resirkulasi dan faktor musim berpengaruh langsung terhadap efisiensi operasional VF-CWs (Boucle *and* Molle, 2012).
- b. Untuk mengatasi keterbatasan transfer oksigen dalam CWs tradisional, dengan tambahan input energi, seperti aerasi buatan dan operasi pasang surut. Teknologi ini tentu dapat meningkatkan kapasitas oksigen di CWs dan mendapatkan kinerja pengolahan (Shubiao *et al.* (2014), tetapi meningkatkan operasi dan biaya pemeliharaan. Inovasi ini dibenarkan jika

biaya siklus yang cukup diimbangi dengan pengurangan biaya modal, mengurangi penghematan biaya pemeliharaan dan peralatan aerasi CWs.

- c. Penyumbatan adalah masalah umum selama umur CWs bawah permukaan, dan tepat memiliki pengaturan *pre-treatment*. Arah aliran balik dan integrasi cacing tanah telah terbukti efektif untuk membantu mengurangi akumulasi padatan di CWs. Kerikil sebagai bahan tanah yang paling banyak digunakan oleh aliran horizontal CWs. *Clogging* permukaan media karena disebabkan oleh mikroorganisme yang terakumulasi di permukaan media sebagai *biofilm* diyakini menjadi penyebab penutupan permukaan (Jowett and McMaster, 1995); pengendapan padatan organik dan anorganik pada lapisan permukaan media filter juga telah dianggap menyebabkan penutupan permukaan (*clogging*) (Platzer and Mauch, 1997; Rodgers *et al.*, 2004).
- d. Bioaugmentasi dapat digunakan untuk mempercepat pembangunan komunitas mikroba yang diperlukan dan mempersingkat masa adaptasi. Namun, bertujuan untuk mengintensifkan degradasi beberapa polutan yang sulit tertentu dari air limbah industri pada CWs. Menurut Shubiao *et al.* (2014), *bioaugmentation* dapat menjadi strategi teknologi pengolahan air limbah tradisional.
- e. Inovasi dari konfigurasi untuk intensifikasi kinerja pada CWs, termasuk koridor aliran sirkuler, air campuran, dan penyekat aliran bawah permukaan CWs. Mengenai masukan energi untuk aliran air pengaruh gravitasi, harus perlu pertimbangan pemompaan untuk mempertinggi level air.
- f. Untuk mengolah air limbah dengan C/N ratio rendah, seperti Nitrat dari limpasan pertanian dan air tanah tercemar, sumber karbon hanya dari eksudat akar *macrophyta* adalah tidak cukup untuk mempertahankan penurunan nitrit dengan kinerja tinggi. Menurut Kampman *et*

al. (2012), *denitrifikasi* dapat ditingkatkan dengan pasokan eksternal donor elektron melalui penambahan karbon organik langsung menggunakan media filtrasi organik dan/atau langkah operasi.

- g. Operasi CWs pada iklim dingin merupakan sebuah tantangan. Berbagai adaptasi yang dimulai dengan desain spesifik (kolam lebih besar dan lebih dalam), alami atau buatan isolasi termal (salju, es, jerami, wol batuan, polystyrene, rumah kaca), dan strategi operasi ditingkatkan (aerasi buatan). Transfer oksigen diperlukan untuk meningkatkan kinerja CWs konvensional yang menguntungkan untuk proses operasi (Shubiao *et al.*, 2011).
- h. Kolaborasi multidisiplin antara para insinyur dan ilmuwan pasti alam akan menginspirasi lebih lanjut ide-ide inovatif dalam pengembangan CWs secara intensif, tetapi keberlanjutan dan ketahanan teknologi baru ini harus dievaluasi secara menyeluruh.

Menurut Demirezen *and* Aksoy (2004), kandungan logam berat Cd, Pb, Cr, Ni, Zn dan Cu terdapat korelasi positif yang kuat ditemukan antara konsentrasi Pb dalam air dan tanaman. Ni dan Pb diakumulasi oleh tanaman pada tingkat yang lebih tinggi dari sedimen bawah dari pada di dalam air. Daun *T.angustifolia* mengakumulasi logam berat kurang dari akar yang sesuai. Ada hubungan yang signifikan antara konsentrasi Cd dalam sampel tanaman dan nilai pH air. Telah ditemukan bahwa jaringan *T.angustifolia* mengakumulasi logam berat lebih besar daripada jaringan *P. pectinatus*. Oleh karena itu, semua tanaman dapat digunakan sebagai indikator biologis sementara untuk menentukan tekanan lingkungan, namun *T.angustifolia* terbukti lebih tepat untuk digunakan.

Menurut Sirianuntapiboon *et al.* (2007), penggunaan arang dari kayu dengan diameter berturut-turut 1, 3, dan 5 cm tidak dapat menunjukkan banyak efek efisiensi sistem dengan beban hidraulik sebesar 0,05 m³/m² hari. Lebih lanjut dengan media tersebut, tanaman *T.*

angustifolia L pada CWs dapat mereduksi penyerapan tingkat rendah sebesar 1,4 % selama operasi 3 (tiga) bulan. Lahan basah buatan *downflow* dengan HRT tersebut dapat menunjukkan efisiensi penurunan BOD antara 95,5—1,7 %, total Nitrogen 92,1—2,3 %, total posfat 95,5—2,7 %, dan SS 94,5—1,6 %.

3. Peran Tanaman *T.angustifolia* L

Berdasarkan peranan tanaman *T. angustifolia* L, beberapa tipe limbah, dan parameter yang diturunkan terhadap pengolahan limbah dalam CWs di beberapa negara dalam kurun waktu 10 tahun terakhir 2004—2014, minimal terdapat 32 jenis hasil penelitian terkait menunjukkan bahwa spesies *T.angustifolia* L telah berperan dalam berbagai pengolahan limbah sebesar 96,429 % (Yalcuk, 2010; Zhang *et al.*, 2010; Jingtao *et al.*, 2011; Stefanakis and Tsihrintzis., 2011; Vymazal, 2013; Leto *et al.*, 2013; Ya-Li, 2014; dan Gill *et al.*, 2014).

Berdasarkan hasil kajian dari Tabel 10 dapat diceritakan bahwa USA, India, China dan Turki merupakan negara-negara yang terbanyak dilevel 10,24 % yang memanfaatkan *T.angustifolia* L dalam sistem CWs untuk *mitigasi* pengurangan limbah. Sementara di Greece, Tunisia, Erlandia, dan Thailand merupakan negara kedua sebesar 6,9 % yang menggunakan *T.angustifolia* L pada sistem CWs. Selbo and Snow (2004); Nivala *et al.* (2007); Kadlec and Zmarthie (2010) menyatakan minimal terdapat 20 parameter di dalam limbah yang telah dikaji. COD merupakan parameter terbanyak (53,571 %); diikuti BOD 42,857 %; PO₄ dan TN, masing-masing 35,714 %; NH₄ 32,143 %; Zn 28,571 %; Pb, Cu dan Cr masing-masing 21,429 %; Ni dan Fe, TSS dan TDS masing-masing 14,286 %.

Peran *T. angustifolia* L pada sistem CWs baik aliran horizontal, aliran permukaan atas, *down flow* dari hasil kajian Tabel 10, mencerminkan bahwa tanaman *T.angustifolia* L sangat

penting dan toleran terhadap variatif jenis limbah. Hasil kajian minimum terdapat 16 tipe air limbah komersial 15,09 %; limbah campuran kota dan RT, limbah domestik dan limbah organik, logam berat limbah *leachate* masing-masing 11,32 %; limbah kompleks: industri, limbah perkotaan dan pertanian masing-masing 7,55 %; *Hoagland's solution*, air limbah buatan berkonsentrasi tinggi, limbah cair dari Phenol dan Melanoidin, air limbah limpasan kota, dan limbah cair lebih dari 20 berbeda tipe berurut-turut 3,77 %. Limbah logam berat industri, dan air limbah yang mengandung Cr (VI) sebesar 1,89 %.

a. Keterlibatan Tanaman *T. angustifolia* L di Dalam CWs

Alasan pemanfaatan sistem CWs dengan memilih tanaman *T.angustifolia* L yang *emergen* dan media pasir yang telah disampaikan di depan dengan merujuk menurut analisis pada Tabel 10 sebagai berikut. Pertama, metode yang murah dan mudah dioperasikan, ramah lingkungan, serta tanaman *T.angustifolia* L dalam pengolahan limbah sebagai faktor dominan dilevel 96,429 %. Kedua, tanaman *T.angustifolia* L dan CW dapat diterapkan pada skala lapangan dilevel 75,0 %. Ketiga, tanaman *T.angustifolia* L dan CWs layak dikembangkan untuk sistem pengolahan secara langsung (*primer effluent*) dilevel 60,714 %. Keempat, tanaman *T. angustifolia* L dalam CWs dapat mengurangi pencemaran air limbah di kota/negara sebesar 46,429 %.

Tabel 10: Peran *T.angustifolia* L dan Tipe Limbah pada SSF-CWs di Beberapa Negara

No	Negara / Lokasi	Tipe Limbah dan Luas Area Cws	Parameter	Metode/Teknis yang Diperankan	Sumber
1	Sultan Marsh Kayseri Turkey	Limbah logam berat dari industri, 200 m ²	Cd, Pb, Cr, Ni, Zn, Cu	Skala lapangan di 13 lokasi, menggunakan tanaman <i>Demirezen and T.angustifolia</i> dan <i>P. pectinatus</i> . Ketebalan sedi- men 30 cm, UC = 2 mm.	Aksoy (2004).
2	Central Ohio, USA	Luas permukaan total 1,0 m ²	Perbedaan jumlah akar	CWs 10 plot; 0,5 x 2 m di tanami campuran <i>T. Selbo and Snow angustifolia</i> dan <i>T.Latifolia</i> dan Hybrid dari keduanya.	(2004).
3	Mexico Santa Maria	Rio Texcoco watershe, Sewage, luasnya (589-5800) m ²	TSS dan COD	Skala lapangan kombinasi, SS-FW menggunakan tanaman <i>ornamentalis</i> dan <i>T.angustifolia</i> serta VF- Cws Reed.	Belmont <i>et al.</i> (2004).
4	Greece	Limbah domestik, total 400 m ²	BOD ₅ , COD, NH ₄ , PO ₄	Skala kecil variasi 5 plot paralel skala kecil SSF-CWs; dimensi : 3 x 0,75x 1 m.	Akratos <i>and</i> Tsihrintzis (2006)
5	Bangkok Thailand.	Limbah domestic, 0,45 m ²	pH, SS, BOD ₅ , NH ₄ NO ₃ , TP, TN	VF-CWs diameter kayu: 1,3, 5 cm. Kedalaman tiap plot 0,35 cm. Volume; 0,23 m ³ /Cws.	Sirianuntapiboon <i>et al.</i> (2007).
6	India	Hoagland's Solution	BOD, COD, TDS, pH, Cl. PO ₄ , Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn	<i>Anaerobic digestion</i> diparalel dengan menggunakan Cws sistem <i>downflow</i>	Chandra <i>et al.</i> (2007).
7	Ireland	Limbah domestik	Merendahan pencemaran air di Irlandia	CWs di Irlandia yang penekanannya pada pengem- bangan teknologi murah dan berkelanjutan.	Babatunde <i>et al.</i> (2007).
8	Anamosa USA.	Lowcos, luas total 93 m ²	BOD,COD ,NH ₄	Skala kecil Cws-SSF dengan proses aerasi sebagai pretreatment untuk kadar Fe dan Mn yang tinggi.	Nivala <i>et al.</i> (2007).
9	Ankara- Turkey	Limbah organik, logam berat limbah <i>leachate</i> luas 26,6 ha.	COD, NH ₄ , dan Fe ⁺³	2 unit VF-CWs, 1 unit HF-CWs. Dioperasikan seri dari unit tangki limbah.	Yalcuk <i>et al.</i> (2008).
10	Chiang- Thailand	Air limbah berkonsentrasi tinggi; luas area 4,522 m ² .	COD dan Total Nitrogen	Skala kecil model Cws seri 9 unit, tiap 3 unit <i>T. angustifolia</i> , 3 dengan <i>U. Sedge</i> dan 3 unit tidak ditanami.	Kantawanichkul <i>et al.</i> (2008).
11	Swabi Pakistan	Limbah industri, limbah perumahan mewah, luas total 4145,71 m ²	Pb, Cd, Fe, Ni, Cr, Cu.	Skala lapangan HFSF-CWs dengan 7 sel paralel bentuk <i>baffle-chanel</i> .	Khan <i>et.al</i> (2009).
12	Tunisia-	Limbah kotoran	Total Nitrat (TN)	Menggunakan Kolam Degester ke VF-CWs (<i>P. Abidi et al.</i>	

	Menzah	manusia, (0,6-1,2) m ² . HLR 0,2 m/hari		<i>australis</i>), di ikuti HF-CWs dan kombinasi terbalik.	(2009)
13	Tunisia, Joogar	Limbah kotoran manusia, (121-207) m ² .	pH, BOD ₅ , COD, TSS, TKN, TP.	Mengkombinasi CWs Vertikal dan horizontal aliran permukaan.	Kouki <i>et al.</i> (2009)
14	Bulgari	Limbah lindi	BOD, COD, NH ₄ , PO ₄ , pH	Percobaan skala laboratorium dengan bertingkat 3	Lavrova <i>et al.</i> (2009).
15	Luckno India	Limbah cair dari phenol dan melanoidin.	Cu, Pb, Ni, Fe, Mn, dan Zn.	Menggunakan 13 boks tersusun seri berdiameter 42 cm tinggi pot 55 cm. CWs sistem vertikal ke bawah.	Chandra and Yadav (2010).
16	Turkey	Limbah pabrik minyak zaitun, 120 m ² .	COD, NH ₄ , PO ₄	3 Unit VF-CWs, ditanamani <i>T.latifolia</i> dan <i>C. alternatifolius</i> , kontrol, kerapatan 40/m ² . Debit limbah 5l/hr , HDT 3 hari.	Yalcuk <i>et al.</i> (2010).
17	Rawa Kucing Tangerang	Limbah Lindi	TN, TP, COD TSS, Pb, Hg DO dan pH	SSF-CW skala proyek di P2L-LIPI Cibinong lindi berasal dari TPA. Sistem berundak.	Satya <i>et al.</i> (2010)
18	Canada.	Limbah: metals, pesticides, crude oil, polyaromatic hydrocarbons, and landfill leachates	BOD, TSS, TP, total coli, Fecal coli	Teknologi Lahan Basah Buatan menggunakan <i>Phytoremediation</i> . Proses dan Aplikasi.	Zhang <i>et al.</i> (2010)
19	Beijing	Air Limbah kota 6500 m ² dan zona air 3500 m ²	COD, TN, dan TP	Sistem lahan basah dibuat secara terpadu (IWS) skala lapangan.	Honggang <i>et al.</i> (2010)
20	Towship USA	Limbah industri	Zin, Ar, Ba, Cl, VOC	Metode riset ini skala proyek yang telah dioperasikan selama 10 tahun.	Kadlec and Zmarthie (2010).
21	Nanshiu- China	Limbah komersial	COD	CWs 6 pot skala kecil, Tinggi: 28, Lebar: 30 cm tiap pot 5 tanaman <i>Typha</i> . Variasi perlakuan konsentrasi di ulangan selama 30 hari.	Jingtao <i>et al.</i> (2011)
22	North Dakota- US	Air limbah limpasan kota. Total 10 kolom diameter 20 cm, 200 cm ²	Be, Cu, Fe, Li, Sr, Zn	Membandingkan kolom berisi tanah dan pasir kondisi kering dan basah yang di tanamani <i>T. angustifolia</i> .	Kisson <i>et al.</i> (2011)
23	Barcelona, Spain	Limbah kota	COD, BOD ₅ dan NH ₄	Lahan basah besar dan kecil di kondisikan paralel	Pedescoll <i>et al.</i> (2011).

24	Xanthi, Greece	Limbah campuran luas 8,2 m ²	BOD ₅ , COD, NO ₃ , TN	Skala kecil 10 unit VF-CWs VF-CWS diameter 0,82 m dan tinggi 1,5 m.	Stefanakis and Tsihrinzis., (2011).
25	China	Limbah cair lebih dari 20 berbeda tipe, sejak 1990-2010.	BOD, COD, TN, Total Posfat	Lebih dari 40 spesies tanaman air pada CWs. Sebagai WTP fasilitas ke-2 dan ke-3.	Ting <i>et al.</i> (2012).
26	Greece	Limbah domestik	Nirogen	Skala kecil 10 Unit CWs tangki plastik silinder (Ø= 0,82 m dan tinggi 1,5 m).	Stefanakis and Tsihrinzis. (2012).
27	India	Limbah industri	Cu, Cr, Co, Ni dan Zn	6 VF-CWs menggunakan PVC tinggi 1 m dan diameter 0,15 m. 3 spesies berbeda <i>C. indica</i> L., <i>C. alternifolius</i> L. dan <i>T. angustifolia</i> L.	Yadav <i>et al.</i> (2012)
28	Praha, Republic	Kompleks: industri, limbah perkotaan dan pertanian	BOD ₅ , COD, TSS, TP, TN, NH ₄ .	Kombinasi HF, VF, dan VF dan HF <i>multi stage</i> .	Vymazal (2013).
29	Italy	Limbah capuran kota dan Rumah Tangga	TSS, BOD ₅ , COD, TKN, NH ₄ TP, faecal <i>Coliform</i> , coli, streptococci, Salmonela	Sekala kecil HFSS –CWs secara terpisah tiga unit berturut-turut (A,B dan C) masing-masing di buat paralel.	Leto <i>et al.</i> (2013)
30	Santo Tomé, Argentina	Limbah Industri, luas 2000 m ² .	Cr; Ni; Fe; Zn; NO ₃ , NO ₂ , BOD dan COD	Skala lapangan dibagi 3 pereode; normal 6 bulan 2009, pereode pemusnahan tanpa aerasi 6 bulan dan pereode pemulihan 10 bulan.	Maine <i>et al.</i> (2013).
31	Provinsi Anhui, China.	Air limbah yang mengandung Cr (VI)	Cr (VI)	Sklan kecil menggunakan 9 spesies tanaman di dalam wetland alami.	Ya-Li <i>et al.</i> (2014)
32	East of Ireland	Limbah Campuran kota dan Rumah Tangga	Cu, Zn, Pb, dan Cd	Kerapatan 500 <i>P. australis</i> dan 500 <i>Typha L</i> 4 tanaman/m ² .	Gill <i>et al.</i> (2014)

b. Teknis Penerapan CWs yang Digunakan

Berdasarkan hasil kajian yang disajikan dalam Tabel 10, dapat dijelaskan bahwa penerapan CWs dapat dikelompokkan menjadi 4 bagian. Pertama, CWs untuk skala terpadu dilapangan pada level 24,14 % yang telah dikaji oleh Chandra *et al.* (2007), Khan *et al.* (2009), Abidi *et al.* (2009), Honggang *et al.* (2010), dan Ting *et al.* (2012). Kedua, dapat diterapkan untuk skala kecil secara paralel pada level 17,24 % yang telah dikaji oleh Lavrova *et al.* (2009), Stefanakis and Tsihrintzis (2012), dan Yadav *et al.* (2012). Ketiga, diterapkan skala lapangan dengan menggunakan model tunggal pada level 13,79 % telah dikaji oleh Satya *et al.* 2010, Pedescoll *et al.* 2011, dan Khan *et.al* (2009). Keempat, CWs diterapkan dengan skala kecil seri dan kombinasi VF-CWs dan HF-CWs masing-masing 10,34 % mengacu pada kajian yang dilakukan Kouki *et al.* (2009), Chandra and Yadav, 2010, Vymazal, (2013), Leto *et al.* (2013).

F. Peran Media Pasir dalam Menyerap Polutan

Saringan pasir lambat (SPL) merupakan salah satu cara pengolahan air baku untuk menghasilkan air bersih, beroperasi secara gravitasi serempak, terjadi proses fisik, proses biokimia, dan proses biologis (SNI, 2008). Unit SPL masih digunakan sebagai proses *filtrasi* pengolahan air di negara Eropa hingga saat ini. Unit ini sudah menjadi teknologi pengolahan air yang efektif lebih dari 150 tahun. Operasionalnya kali pertama terjadi pada tahun 1830 di Inggris, yang di desain secara sederhana dengan cara melewati air melalui suatu media pasir tanpa bantuan proses kimia ataupun mekanis. Oleh karena aliran air persatuan luas pada filter sangat kecil, selanjutnya dikenal dengan nama saringan pasir lambat (SPL) (Taweel and Ali, 1999).

Sistem di dalam SPL air mengalir secara gravitasi melalui lapisan pasir halus dengan kecepatan rendah. Dalam kondisi rata-rata harian diperlukan kecepatan filtrasi rendah sekitar $0,1\text{--}0,4 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{jam}$. Lapisan filter tersusun dari pasir halus dengan diameter efektif antara $0,15\text{--}0,35 \text{ mm}$ materi *suspensi* dan koloid dari air baku akan tertahan di lapisan teratas filter yang dapat menimbulkan penyumbatan. Saringan Pasir Lambat (SPL) yang beroperasi dengan baik akan dapat menurunkan bakteri 98—99,5 % dari air baku, Enterik bakteri 90—99,9 %; Enterik virus 99—99,99 %, Giardia kista 99—99,99 % (Bellamy *et al.*, 1985), besi dan mangan antara 30—90 % (Ellis *et al.*, 1985). Hal ini dikarenakan terbentuknya suatu lapisan tipis pada permukaan pasir, di mana lapisan ini akan terbentuk setelah beberapa hari sampai beberapa minggu lamanya filter beroperasi (Reynold *and* Richards, 1996). Fase pada saringan pasir lambat ini kemudian berlanjut pada fase pematangan selama beberapa minggu setelah dilakukan pengoperasian selama fase ini. Banyak *microbial zoogeleal* yang tumbuh dengan sendirinya di lapisan atas filter ini yang dikenal dengan nama lapisan *schmutzdecke*. Pada lapisan inilah paling banyak terjadi pendegradasian atau pengurangan partikel tersuspensi, bakteri, dan bahan organik. Namun setelah beberapa lama *headloss* akan meningkat, sehingga harus dilakukan pencucian filter.

Secara biologis terjadinya penyumbatan di media filter sering menjadi masalah (Siegrist, 1987). Penyumbatan lapisan atas dari saringan pasir meningkatkan waktu *retensi* air rata-rata dalam filter dan mengurangi daerah yang efektif yang tersedia untuk air *infiltrasi* ke titik di mana menjadi daerah genangan air. Penyumbatan (*clogging*) permukaan mungkin karena beberapa sebab. Mikroorganisme yang terakumulasi di permukaan media sebagai *biofilm* diyakini menjadi sebab penutupan permukaan (Vandevivere *and* Baveye, 1992; Schwager *and* Boller, 1997; Bouwer *et al.*, 2000). Dalam proses ini, polimer *ekstraseluler* terhidrasi

(*exopolymers*), sel menumpuk di lapisan atas media pasir, dan menimbulkan penurunan permeabilitas (Schwager and Boller, 1997).

Siegrist and Boyle (1987) menemukan akumulasi bahan organik di lapisan pasir atas, sehingga pernyataan tersebut menunjukkan bahwa akumulasi bahan organik itu mungkin telah mengalami *humification*, yang secara bertahap mengisi ruang pori, dan mengurangi permeabilitas media pasir. Jowett and McMaster (1995) mengatakan jenis media filter pengendapan padatan organik dan anorganik pada lapisan permukaan juga telah dianggap menyebabkan penutupan permukaan (*clogging*) (Platzer and Mauch, 1997; Rodgers *et al.*, 2004).

Elbana *et al.* (2012) mengatakan hasil penelitiannya tentang media filter pasir merupakan salah satu filter yang paling umum digunakan dalam mikro-sistem irigasi, terutama untuk penyaringan air dengan jumlah besar dengan kontaminan bahan organik seperti limbah yang direklamasi. Eksperimen tersebut menggunakan limbah yang direklamasi untuk mengevaluasi efisiensi kinerja media filter pasir dengan diameter efektif 0,32; 0,47; 0,63; dan 0,64 mm dalam menurunkan *turbidity* dan meningkatkan kandungan DO.

Studi ini juga berusaha untuk menentukan periode pematangan filter dan efek *backwash* filter pada efisiensi penyaringan. Efisiensi penurunannya bergantung pada ES. Penurunan kekeruhan dicapai 59,6—85,4 % dan peningkatan DO 4,5—15,7 %. Periode pematangan media filter selama percobaan adalah 15 menit dan secara keseluruhan hasil mendukung gagasan *backwashing* setiap hari adalah praktik perawatan yang baik karena mengurangi *backwashing* tidak efisien dan meningkatkan oksigen terlarut (Elbana *et al.*, 2012). SPL paling cocok digunakan di negara-negara beriklim tropis dengan sistem ini. Hal ini dikarenakan pada iklim tropis mempunyai suhu yang hangat, sehingga akan membantu keefektifan dan keefisienan dari

lapisan *schmutzdecke*. Sedangkan untuk daerah yang memiliki 4 musim, filter harus ditutup untuk menjaga pertumbuhan bakteri dan mikroba pada lapisan ini pada musim dingin.

Aliran yang melalui filter dapat dikontrol dengan baik oleh katup *inlet* dan *outlet* yang diatur secara harian. Apabila *headloss* yang melalui filter telah mencapai nilai maksimal yang diijinkan (*operasional head* sampai 1,0—1,5) m, maka lapisan atas media pasir harus dikeruk sekitar 1,5—2 cm dan operasionalnya dapat dilanjutkan kembali. *Schmutzdecke* meluas hingga di bawah ketebalan 2 cm. Oleh karena itu, pembuangan ujung atas sebanyak 2 cm tidak akan memperbaiki kinerja filter secara *signifikan*. Tetapi kualitas air *effluen* setelah pengerukan akan menurun. Untuk itu diperlukan 1—2 hari untuk persiapan ulang pengoperasian *filter*. Dua *filter* akan digunakan untuk operasional terus menerus tanpa sela dalam memproduksi air dengan kualitas tertinggi. Saringan pasir lambat penggunaannya dapat berhasil dengan baik jika kualitas influennya baik, yaitu kekekeruhan kurang dari 10 NTU (Rusdiono, 1993).

1. Mekanisme Filtrasi

Filtrasi adalah suatu proses fisika dan kimia untuk memisahkan zat-zat tersuspensi dan koloid dari air dengan melewati pada media porous biasanya atau bahan butiran. Secara umum, peran penghilangan kotoran-kotoran (*impurities*) pada proses filtrasi merupakan kombinasi dari berbagai proses yang berbeda. Yang terpenting adalah *mechanikal straining*, sedimentasi, *adsorpsi*, aktifitas kimia, dan aktifitas biologis (Huisman and Wood, 1974).

2. Faktor yang Memengaruhi Proses Filtrasi

Proses filtrasi pada saringan pasir lambat terjadi dengan memisahkan air dari kandungan kontaminan berupa partikel tersuspensi dan koloid, serta bakteri dengan cara melewati air pada suatu media berpori. Pada prinsipnya, material ini dapat berupa material apa saja seperti

lapisan granular pasir, batu yang dihancurkan, *antrachite*, kaca, dan sisa arang. Dalam praktiknya di lapangan, media berpori yang paling sering digunakan adalah pasir. Hal ini dikarenakan pasir mudah ditemui dalam jumlah banyak, biaya yang murah, dan hasil pengolahan yang diberikan juga sangat memuaskan.

Secara keseluruhan penurunan kontaminan dengan proses filtrasi merupakan kombinasi dari beberapa proses yang berbeda-beda, dan yang terpenting adalah *mechanical straining*, sedimentasi, dan adsorpsi, dan aktivitas biologi (Longsdon *et al.*, 2002). Proses *filtrasi* juga terjadi reaksi kimia dan fisika sehingga banyak faktor yang saling berkaitan yang akan memengaruhi kualitas air hasil *filtrasi*, efisiensi, dan sebagainya. Faktor-faktor tersebut antara lain debit filtrasi, ketebalan media, ukuran dan jenis media, kualitas air baku, dan temperatur (Fair *et al.*, 1981).

3. Kelebihan dan Kelemahan Saringan Pasir Lambat (SPL)

SPL merupakan instalasi pengolahan air yang mudah, murah, dan efisien. SPL mempunyai derajat efisiensi yang tinggi untuk menghilangkan kekeruhan, rasa, dan bau pada air. Bahkan, mampu menghilangkan bakteri dengan sangat baik. Menurut Huisman *and* Wood, 1974; dan Birdi (1979), kelebihan dan kelemahan SPL dapat diperhatikan pada Tabel 11.

Tabel 11: Kelebihan dan Kelemahan Media Pasir Lambat

No	Kelebihan	Kelemahan
1	SPL telah dibuktikan secara meyakinkan dalam kaitannya dengan kualitas air minum yang aman untuk dikonsumsi dari segi bakteriologis pada tahun 1892 di kota Hamburg dan Altona, yang air minumannya tercemar sehingga mengakibatkan epidemi penyakit kolera.	Saringan pasir lambat daya penyaringannya yang rendah, sehingga dalam konstruksinya memerlukan area yang luas. Rendahnya daya penyaringan ini disebabkan karena kecepatan air mengalir melalui saringan pasir lambat sangat kecil.
2	Di kota Altona yang menggunakan instalasi pengolahan air dengan saringan pasir lambat pengaruh diameter dan ketebalan pasir dalam saringan pasir lambat terhadap penurunan kadar besi terhindar dari epidemi penyakit itu, sedangkan kota Hamburg yang tidak menggunakan instalasi pengolahan air dengan saringan pasir lambat, terjangkit wabah dengan kematian warganya sebanyak 7582 orang (<i>Huisman and Wood, 1974</i>).	Konstruksi memerlukan biaya yang tinggi (seperti di Belanda tahun 1965 dalam 1 m ² SPL memerlukan biaya sebesar 3000 dolar, jika dibandingkan dengan SPC dalam 1 m ² SPC perlu biaya sebesar 500 dolar).
3	Kedua pengolahan tersebut diperlukan perbandingan tenaga tidak terlatih dengan perbandingan 1:10. Biasanya di Belanda SPL digunakan dipedesaan tapi saat ini kota besarpun sudah menggunakan SPL.	Saringan pasir lambat (SPL) sangat cocok digunakan dalam skala kecil (<i>Birdi, 1979</i>).
4	SPL pengoperasiannya tidak begitu sulit. Kebutuhan tenaga ahli untuk operasi dan pemeliharaan tidak begitu penting. Di negara berkembang dapat digunakan materi lokal tidak diperlukan peralatan mekanis yang didatangkan dari negara maju.	Perlu lahan yang luas untuk pembangunannya (50 kali lebih luas dari saringan pasir cepat (SPC)).
5	SPL tidak hanya efisien dalam menurunkan bakteri dan zat tersuspensi saja, akan tetapi dapat mengubah zat organik yaitu dengan cara oksidasi.	

Sumber: *Huisman and Wood, 1974; Birdi., (1979).*

BAB III

KERANGKA TEORI, KERANGKA KONSEP, DAN HIPOTESIS

A. Kerangka Teori

Tumpukan sampah di tempat pembuangan akhir (TPA) merupakan akumulasi berbagai jenis sampah yang berasal dari beberapa sumber, seperti pasar, tempat umum, perdagangan, pusat perkantoran, pusat industri, rumah sakit, bahkan dari rumah tangga dan industri rumah tangga. Proses dekomposisi pada tumpukan sampah di dalam TPA akan menghasilkan karakteristik limbah lindi (*leachate*) yang membahayakan, pencemaran air, tanah, dan lingkungan.

Beberapa penelitian mengenai karakteristik limbah lindi hasil dari TPA menunjukkan adanya jumlah kandungan pH dan DO di bawah normal, serta TDS, BOD, COD, dan Pb telah mengalami kondisi cemar sesuai baku mutu limbah cair dalam peruntukannya. Apabila kandungan organik limbah lindi di dalam air jumlahnya semakin besar, maka terdapat indikasi bahwa perairan tersebut telah tercemar limpasan limbah lindi dari TPA.

Berdasarkan temperatur, dan tekanan, kelarutan oksigen jenuh dalam air pada 25°C dan tekanan 1 atmosfer sebesar 8,32 mg/L. Nilai O₂ kurang dari 8,32 mg/L terindikasi perairan telah tercemar. BOD yang diperkenankan untuk kepentingan air minum dan menopang kehidupan organisme akuatik antara 3,0—6,0 mg/L (APHA-AWWA, 1998). Nilai COD tinggi tidak diinginkan bagi kepentingan perikanan dan pertanian. COD di perairan yang tidak tercemar kurang dari 20 mg/L, sedangkan di perairan tercemar lebih dari 200 mg/L, dan pada limbah industri dapat mencapai 60.000 mg/L (APHA-AWWA, 1998). Logam berat Pb dalam tanah terlalu tinggi mempunyai efek semakin berkurangnya mikroorganisme, sehingga dapat

berpengaruh pada kualitas tanah dan produktifitas primer. Kandungan logam berat dan nutrisi mikro di dalam tanaman harus di bawah ambang batas, agar tidak beracun bagi makhluk lainnya.

Limpasan bahan pencemar limbah *leachate* dapat menyebabkan dampak negatif yang sangat membahayakan. Dampak negatif tersebut di antaranya air tanah telah tercemar oleh limbah lindi, sehingga airnya tidak layak dikonsumsi sebagai air minum. Selanjutnya, gagal tambak Udang panen yang diakibatkan airnya tercemar oleh limbah lindi, masyarakat mengeluh yang tinggal di sekitar lokasi TPA. Kasus pencemaran air sumur masyarakat radius 500 meter dari TPA Putri Cempo Surakarta, karena airnya mengandung bakteri *Eschericia Coli*. Kasus di kota Gdansk-Polandia dari 33,8 ha TPA yang beroperasi sejak tahun 1973, telah menyebabkan dampak menurunnya kualitas air permukaan yang tercemar TOC (*total organic carbon*) (Melnyk *et al*, 2014).

Faktor yang berpengaruh terhadap kualitas limbah lindi disebabkan oleh komposisi sampah, kondisi pH, dan umur lindi. Semakin muda umur lindi, maka kandungan organiknya cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan umur lindi yang tua. Hal ini dikarenakan telah mengalami degradasi secara alami.

Dampak negatif limpasan limbah lindi di lingkungan dapat dikurangi dengan menggunakan pengolahan limbah lindi (*leachate*) dan beberapa alternatif. Beberapa alternatif yang dimaksudkan tersebut di antaranya pengolahan biologis, fisik, dan kimiawi, *recycle* lindi, evaporasi lindi, dan pengolahan secara alami dengan melibatkan peran tanaman air (*makrofita*) dan media pasir tersusun. Metode pengolahan limbah lindi yang melibatkan peran tanaman air dan media pasir tersusun yaitu menggunakan lahan basah buatan (CWs).

Alternatif lain penggunaan metode CWs dikarenakan murah, mudah dioperasikan, dan ramah lingkungan. Lahan basah buatan (CWs) aliran horisontal prinsipnya limbah lindi

mengalir secara horizontal, sehingga pada kondisi ini tidak terdapat air pada permukaan media. Metode ini memerlukan kemiringan (*slope*) di bagian dasar kolam 1—5 %, sedangkan metode aliran vertikal (*down flow*), laju aliran (HRT), dan efek resirkulasi perlu diperhitungkan untuk desain sebuah CWs sistem aliran vertikal. Dua metode sistem tersebut mempunyai efek terhadap efisiensi penurunan BOD dan COD yang memerlukan waktu tinggal. Lahan basah buatan aliran vertikal ke bawah (*downflow*) yang menggunakan jenis tanaman *common reeds* (*P. australis*) dan cattails (*T. latifolia*) dengan media porous bauksit dan zeolit telah terbukti dapat memberikan efek *effluent* dalam penurunan bahan organik seperti (BOD dan COD) yang cukup signifikan. Dua jenis tanaman tersebut dapat bertahan pada kedalaman air 15—60 cm, dan dapat digunakan untuk lahan basah aliran permukaan maupun aliran permukaan bawah (SSF-CWs).

Pengolahan air limbah menggunakan tumbuhan air (*makrofita*) secara umum dapat memanfaatkan simbiosis mikroorganisme dalam tanah dan tumbuhan air. Bakteri menguraikan bahan organik menjadi molekul atau ion yang dapat diserap oleh tumbuhan. Tanaman pada lahan basah maupun CWs berkontribusi mengangkat kontaminan dengan mengubah sistem hidrologi, mengeksekusi partikulat, dan menghimpun polutan. Proses-proses tersebut dapat digunakan untuk pendekatan pengolahan, baik dengan teknik *phytoextraction*, *rhizofiltration*, dan *phytostabilization*.

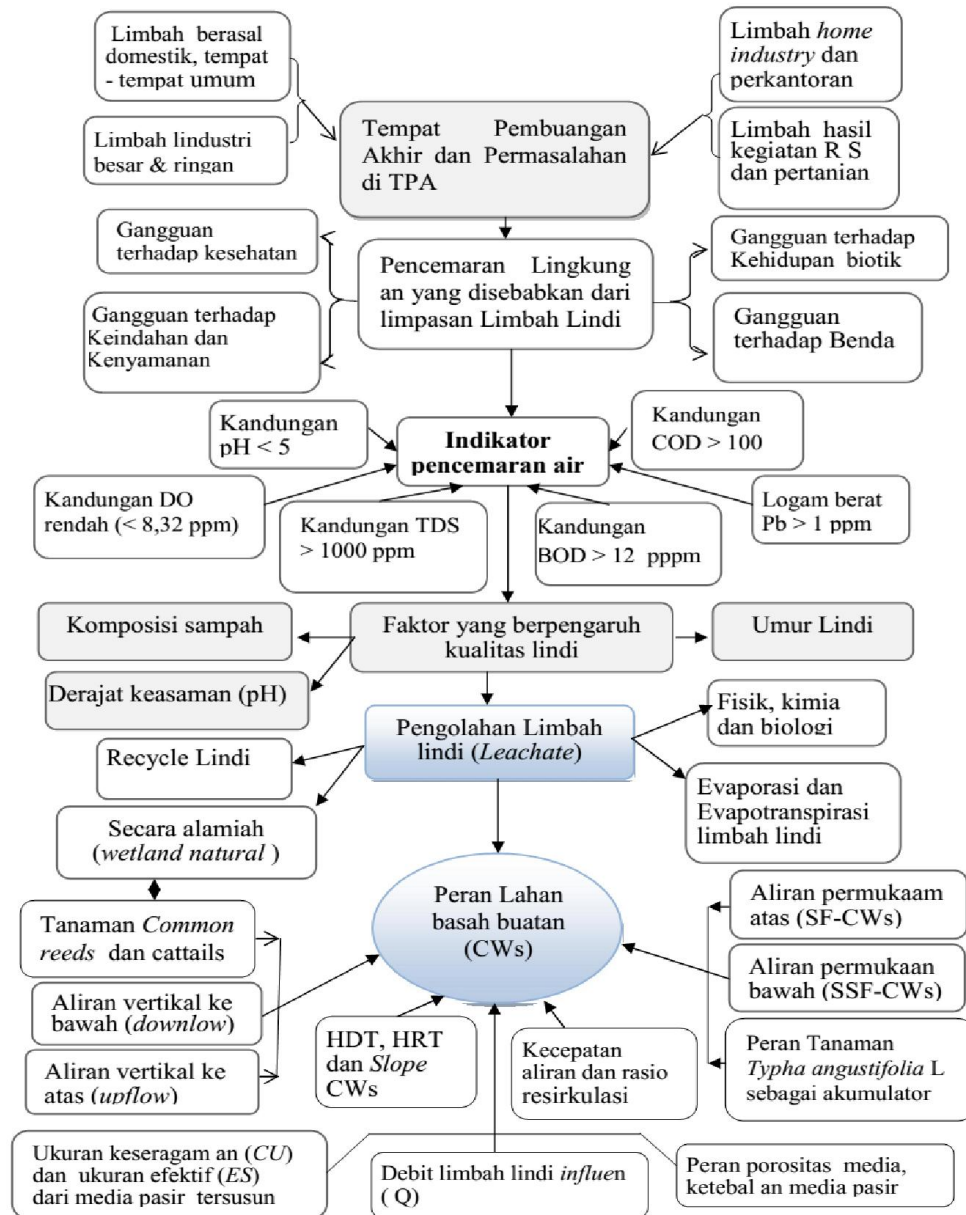
Eliminasi polutan (termasuk logam berat) dalam air limbah dapat terjadi dengan proses secara fisik, kimia, dan biologi yang cukup kompleks, serta interaksi dan asosiasi antara media, tumbuhan *makrophyta* dan mikroorganisme. Interaksi dan asosiasi tersebut dapat berupa pengendapan zat padatan tersuspensi; filtrasi dan presipitasi kimia pada media; transformasi secara kimia; *adsorpsi* dan pertukaran ion dalam permukaan tanaman maupun media;

transformasi dan penurunan polutan maupun nutrient oleh mikroorganisme maupun tanaman; dan mengurangi mikroorganisme pathogen.

Beberapa kriteria desain yang perlu dipertimbangkan pada desain CWs di antaranya *hidraulic detention time* (HDT), *organic loading rate* (OLR), luas permukaan penampang CWs, kedalaman media, serta kecepatan beban organik. Kriteria desain tersebut memiliki efek terhadap proses dan kualitas *effluent* limbah sebelum dialirkan ke lingkungan.

Ada prinsip penting di dalam sistem lahan basah. Prinsip penting tersebut di antaranya tanaman dominan berfungsi sebagai penyerap polutan dan membantu meningkatkan kandungan O₂ pada sistem akar tanaman. *Porositas* media pasir mempengaruhi waktu tinggal air limbah dalam lahan basah, sehingga kesempatan *mikroorganisme* dapat tumbuh di media pasir dan untuk melakukan kontak dengan air limbah dan ketersediaan oksigen yang cukup. Tanaman air memperbesar area permukaan untuk pertumbuhan *mikroorganisme* pada sistem akar, batang, atau daun, serta sebagai penyekat permukaan *bed*.

Tanaman *T. angustifolia* L adalah salah satu **tumbuhan yang hidup di rawa, tumbuh di daerah yang berlumpur, dan memiliki air yang cukup.** *T. angustifolia* L merupakan tanaman eksotis invasif di Amerika Utara yang sering membentuk monokultur di lahan basah dan lebih invasif dibandingkan dengan anggota asli dari genusnya (Jarchow and Cook, 2009). *T. angustifolia* L merupakan salah satu spesies tanaman yang frekuensinya lebih umum digunakan di dalam FWS-CWs. Tanaman *T.angustifolia* L merupakan **jenis tumbuhan yang hidup di rawa, berlumpur, serta toleran dengan kondisi bahan tercemar yang dapat mengakumulasi dan menurunkan kandungan limbah lindi.**



Gambar 6: Kerangka Teori

Berkaitan dengan sistem CWs, peran media tanah diganti dengan media pasir yang tersusun dengan ukuran efektif (*ES*), ukuran keseragaman (*UC*), waktu tinggal, dan beban hidraulik. Media pasir yang tersusun berperan penting di dalam penerapan CWs. Media pasir

tersusun di samping sebagai media tumbuh bagi tanaman, juga memiliki kinerja sebagai *absorpsi* polutan yang mengalami proses fisik, kimia, maupun biologis di dalam pembentukan *biofilm* pada permukaan media pasir. Media pasir dengan *ES*: 0,32; 0,47; 0,63; dan 0,64 mm memiliki kinerja untuk menurunkan kekeruhan (*turbidity*) dan meningkatkan kandungan oksigen terlarut dalam air limbah yang reklamasi.

Periode pematangan media saringan secara keseluruhan hasilnya mendukung ide bahwa *backwashing* dapat meningkatkan kandungan DO serta mengurangi *clogging* di permukaan media pasir. Penyumbatan lapisan di bagian atas media pasir dapat meningkatkan waktu *retensi* rata-rata air limbah di dalam media, sehingga dapat mengurangi daerah efektif yang tersedia untuk *infiltrasi* ke titik di mana digenangan air. Penyumbatan di permukaan media pasir merupakan akumulasi dari *mikroorganisme* sebagai *biofilm* yang diyakini menjadi sebab terjadinya *clogging*.

Gambar 6 telah diperlihatkan hubungan beberapa faktor yang mempengaruhi kinerja efisiensi penurunan kandungan bahan pencemar dari limbah lindi pada lahan basah buatan (CWs).

B. Kerangka Konsep

Kerangka konsep penelitian ini diilustrasikan hanya variabel utama dan variabel penyerta, serta hubungan antar variabel yang diteliti. Atas dasar kerangka teori dan hasil kajian referensi dari berbagai sumber penelitian terkait, serta batasan permasalahan yang akan dikaji, maka disusun kerangka konsep penelitian yang akan dilaksanakan. Kerangka konsep ini disusun dengan alur diagram yang disajikan pada Gambar 7.

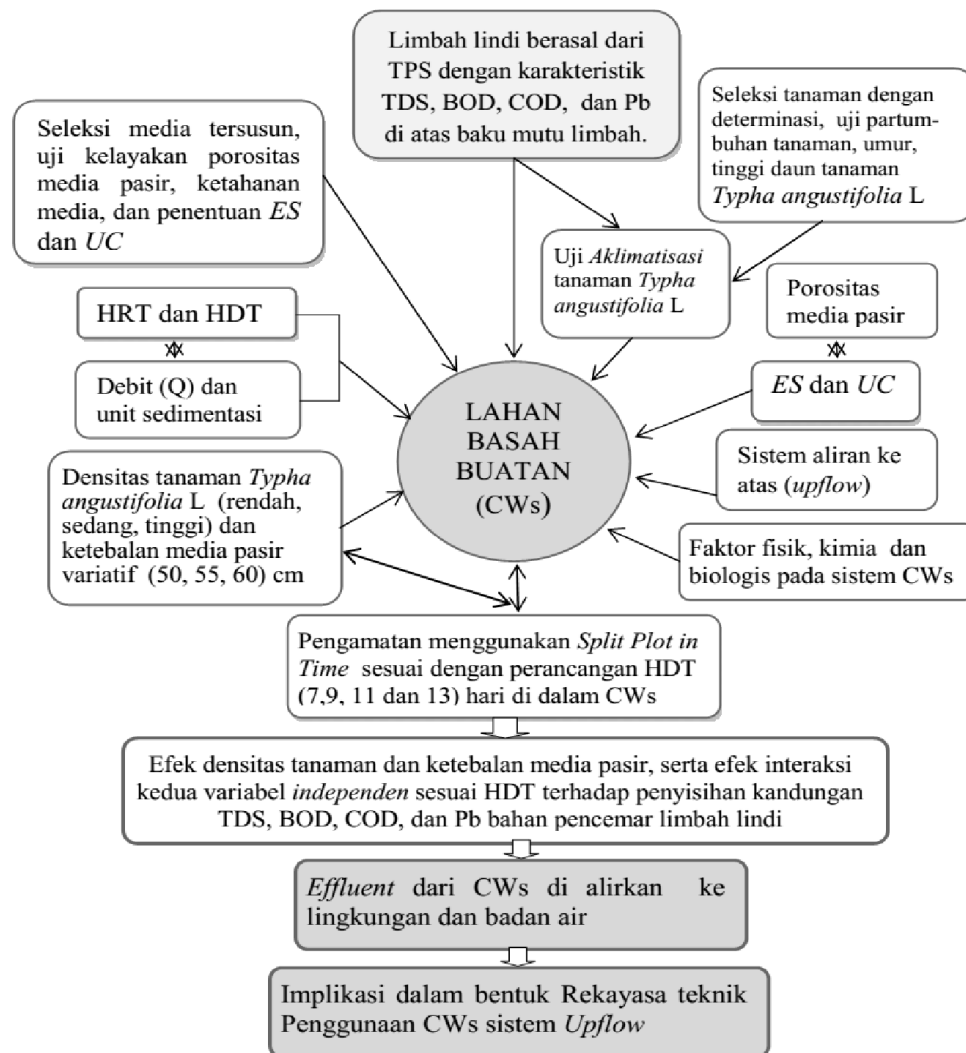
Limpasan bahan pencemar dari limbah lindi mempunyai karakteristik unsur TDS, BOD, COD, dan logam berat Pb di atas baku mutu yang dipersyaratkan. Dampak negatif kandungan unsur-unsur tersebut terhadap lingkungan salah satunya dapat dikurangi dengan menggunakan CWs yang melibatkan peran tanaman *adaptif* pada limbah tercemar dan media pasir tersusun. Hal tersebut karena sistem CWs tidak memerlukan biaya operasional tinggi dan ramah lingkungan.

Berdasarkan Gambar 7, dapat diuraikan beberapa peran berkait dengan variabel yang diteliti. Beberapa peran dan variabel yang dimaksud di antaranya: HDT (*hidraulik detention time*). HDT merupakan waktu tinggal air limbah di dalam sistem CWs sampai mencapai *effluent* BOD yang diinginkan. HRT (*hidraulik retention time*). *ES (effective size)* merupakan ukuran efektif media pasir yang ditinjau dan perlu dikaji melalui uji ukuran efektif media pasir. *UC (uniformity coefferisien)* satuan dari ukuran angka keseragaman media filter yang dinyatakan dengan perbandingan antara ukuran diameter pada 60 % fraksi berat terhadap ukuran efektif, *UC* adalah P^{60}/P_{10} . Debit (*Q*) merupakan ukuran kapasitas air limbah yang dikaji dalam satuan volume per waktu. *Split plot in time* suatu pengamatan yang berulang berdasarkan perubahan waktu dan bertahap dari suatu percobaan pada lahan basah buatan (CWs). *Upflow* merupakan arah air limbah mengalir dari bawah ke atas (*upflow*), melalui media pasir dan mengalami waktu tinggal pada satuan luas per satuan waktu. *Aklimatisasi test* merupakan uji kesesuaian spesies tanaman *T.angustifolia* L pada media terbaru. Densitas tanaman berkorelasi dengan area tumbuhnya tanaman yang ditempati terkait dengan tersedianya unsur hara, air, dan sinar (cahaya). Ketebalan media pasir merupakan faktor penentu dalam penyerapan secara fisik-kimia bahan-bahan organik di dalam limbah.

Gejala yang diteliti berdasarkan kerangka teori yang telah dikaji kelayakannya sebelumnya, meliputi (1) tanaman *T.angustifolia* L yang digunakan di dalam CWs merupakan

tanaman *adaptif* pada limbah tercemar. Oleh karena itu, perlu dilakukan *aklimatisasi test* dan temuan awal tanaman tentang spesies *T.angustifolia* L. Berdasarkan hasil determinasi, *T.angustifolia* L merupakan spesies tanaman yang sangat toleran pada kondisi kadar Salinitas tinggi; (2) densitas tanaman *T.angustifolia* L yang bervariasi (rendah, sedang dan tinggi) di dalam CWs memiliki kemampuan berbeda-beda untuk menyerap kandungan zat-zat organik maupun anorganik limbah termasuk logam berat. Penyerapan logam berat oleh tanaman berlangsung melalui akar, translokasi ke batang, selanjutnya ke daun tanaman; (3) seleksi media pasir tersusun dengan karakteristik media pasir memenuhi ketahanan fisik dari limbah lindi, di mana penyusutan ketahanan fisik media pasir yang dianjurkan tidak melebihi dari 2 %, sehingga tidak mudah tergerus oleh kondisi limbah yang memiliki pH sangat rendah. Media pasir memenuhi kelayakan *UC* kurang dari 3. Porositas media pasir antara 40—70 % yang dipersyaratkan (EPA, 1998). Media pasir memenuhi syarat pada *ES* berkisar 0,3—1,04 mm dan ketebalan media pasir yang bervariasi 50, 55, dan 60 cm mempunyai kinerja yang berbeda-beda untuk penyerapan bahan pencemar limbah lindi secara fisik; (4) ketebalan media pasir menyebabkan waktu tinggal limbah lindi yang berlangsung di dalam CWs. Media pasir dapat digunakan sebagai media tumbuh bagi mikroorganisme dan melekat dipermukaan media pasir, sehingga mempunyai peluang kontak langsung secara biologis dengan zat-zat organik maupun anorganik limbah lindi.

Berdasarkan gejala dari faktor-faktor yang diteliti pada Gambar 7 tentang kerangka konsep, maka penurunan bahan-bahan organik limbah lindi sistem CWs dipengaruhi oleh proses secara fisik, kimia, dan biologis. Partikel-partikel disaring secara mekanis sebagai media pasir air terakhir di sejumlah akar. Efek primer mengalami proses *sedimentasi* di bagian bawah reaktor. Zat-zat padatan dan bahan pencemar mengalami proses pengendapan secara gravitasi di dalam unit pengendap, selanjutnya efek sekunder terjadi proses filtrasi di dalam media pasir.



Gambar 7: Kerangka Konsep

Filtrasi merupakan suatu proses fisika dan kimia untuk memisahkan zat-zat *tersuspensi* dan koloid dari air dengan melewatkan air limbah pada media pasir *porous* atau bahan butiran. Proses penurunan BOD secara biologis oleh metabolisme bakteri, disebabkan oleh efek primer bakteri, yakni penurunan padatan koloid, padatan terendap dan terlarut, pengaruh tekanan tanaman, bakteri *netrifikasi*, dan *denitrifikasi*. Sedangkan efek tambahan, terjadi efek penurunan rendah seketika dari kontaminan lain berupa pengendapan secara gravitasi dari padatan dan

bahan pencemar sejenis di dalam unit pengendap. Wood (2001) menyatakan untuk mengurangi konsentrasi COD dan BOD terlarut dapat dihilangkan dengan proses gabungan kimia dan biologi melalui aktivitas mikroorganisme maupun tanaman. Kandungan logam berat termasuk Pb dapat diturunkan secara primer dengan penyerapan (*absorpsi*) tanaman, di mana kondisi tidak layak jumlahnya signifikan dengan kontaminan yang akan diserap oleh tanaman ditranslokasi ke akar, batang, dan daun. Selanjutnya, penyerapan pada permukaan media. Efek tambahan berupa pengendapan secara gravitasi dari padatan dan bahan pencemar sejenis di dalam unit pengendap.

Pengaruh dari masing-masing densitas tanaman dan ketebalan media pasir yang berbeda memengaruhi waktu tinggal limbah lindi di dalam CWs, yang dapat menurunkan TDS, BOD, COD, dan logam Pb. *Effluent* dari CWs sebelum di aliran ke lingkungan dikondisikan menggunakan CWs sistem *upflow* hasil temuan penelitian ini dalam bentuk metode berupa rekayasa teknik yang telah diuji sesuai dengan pendekatan teori, kajian penelitian terakait dan rekayasa lingkungan.

C. Hipotesis

Hipotesis merupakan jawaban sementara terhadap masalah yang telah dirumuskan sebelumnya. Berdasarkan permasalahan yang telah disampaikan dalam latar belakang, rumusan masalah, tujuan, serta kajian teori, maka hipotesis penelitian ini dapat dijelaskan sebagai berikut.

1. Hipotesis Mayor

- a. Ada pengaruh densitas tanaman *T. angustifolia* L, dan pengaruh ketebalan media pasir aliran ke atas (*upflow*) pada CWs berdasarkan waktu terhadap penurunan TDS, BOD, COD.

- b. Ada pengaruh interaksi antara densitas tanaman *T. angustifolia* L dan ketebalan media pasir aliran ke atas (*upflow*) pada CWs berdasarkan waktu terhadap penurunan TDS, BOD, COD.
- c. Ada perbedaan dan ada korelasi di akar, daun *T.angustifolia* L, media pasir, *influent* dan *effluent* terhadap penurunan logam berat Pb pada CWs aliran ke atas (*up flow*).

2. Hipotesis Minor

Hipotesis minor merupakan proses uji statistik yang dilakukan di dalam penelitian. Hipotesis minor terdiri atas 3 bagian.

a. Ho (Hipotesis nul)

- 1). Efisiensi penurunan TDS, BOD, dan COD bahan pencemar limbah lindi tidak dipengaruhi oleh densitas tanaman *T.angustifolia* L dan **ketebalan media pasir pada CWs sistem *upflow* berdasarkan waktu.**
- 2). Efisiensi penurunan TDS, BOD, dan COD bahan pencemar dari limbah lindi tidak berinteraksi dengan densitas tanaman *T. angustifolia* L dan **ketebalan media pasir pada CWs sistem *up flow* berdasarkan waktu.**
- 3). **Tidak ada** perbedaan dan tidak ada korelasi antara kandungan logam berat Pb pada media pasir, akar, dan daun tanaman *T.angustifolia* L, *influent* dan *effluent* sebagai *bioakumulasi* bahan pencemar limbah lindi.

b. H1 (hipotesis 1)

- 1). Efisiensi penurunan TDS, BOD, COD bahan pencemar limbah lindi dipengaruhi secara signifikan oleh densitas tanaman *T.angustifolia* L dan **ketebalan media pasir berdasarkan waktu pada CWs sistem *upflow*.**

- 2). Efisiensi penurunan TDS, BOD, COD bahan pencemar dari limbah lindi berinteraksi secara signifikan dengan densitas tanaman *T.angustifolia* L dan **ketebalan media pasir berdasarkan waktu pada CWs sistem *up flow*.**
- 3). **Ada** perbedaan dan ada korelasi secara signifikan antara kandungan logam berat Pb pada: media pasir, akar, dan daun tanaman *T.angustifolia* L, *influent* dan *effluent* sebagai *bioakumulasi* bahan pencemar limbah lindi.

Berdasarkan kerangka teori dan konsep yang telah disampaikan di depan, maka untuk menjawab hipotesis penelitian diperlukan pernyataan yang berhubungan dengan efisiensi penurunan TDS, BOD, COD dan Pb limbah lindi yang dipengaruhi serta interaksi signifikan antara densitas tanaman *T.angustifolia* L dengan ketebalan media pasir. Mengenai pembahasan tentang variansi densitas tanaman, ketebalan media pasir, serta adanya faktor kontrol dikelompokkan dalam 2 aspek.

- a. Jika densitas tanaman *T.angustifolia* L semakin tinggi, dan media pasir semakin tebal diikuti semakin tingginya penurunan *effluent* TDS, BOD, COD, dan Pb dari CWs sistem *upflow*, maka hal tersebut tidak efisien penurunannya.
- b. Jika densitas tanaman *T.angustifolia* L semakin rendah dan media pasir semakin tidak tebal diikuti semakin tinggi penurunan di *effluent* TDS, BOD, COD, dan Pb dari CWs sistim *upflow*, maka hal tersebut dikatakan semakin tinggi efisiensi penurunannya.

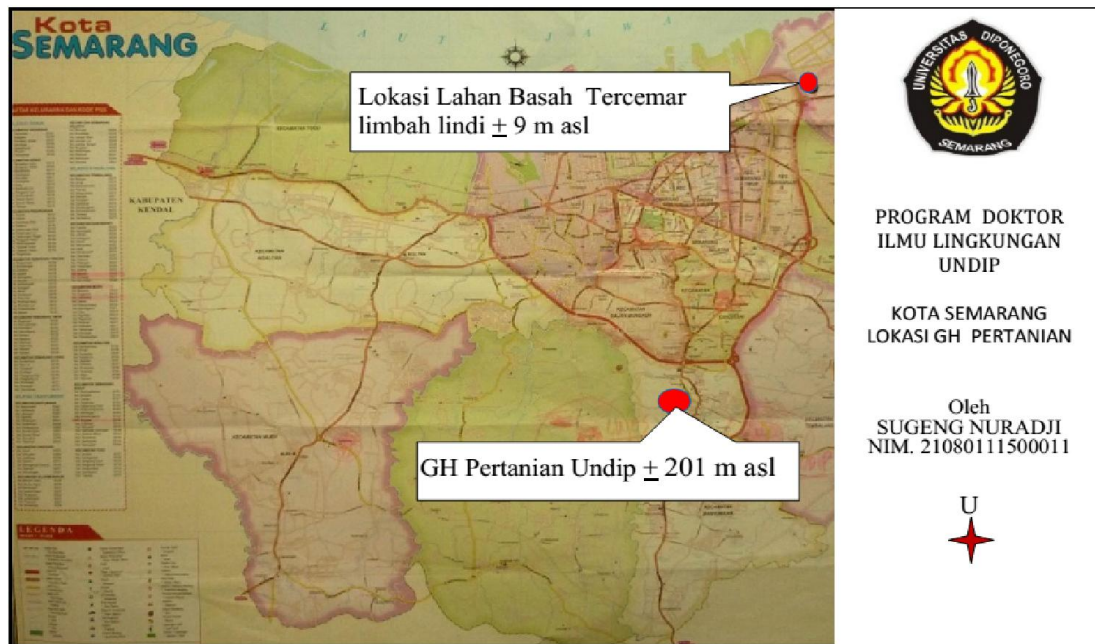
BAB IV

METODE PENELITIAN

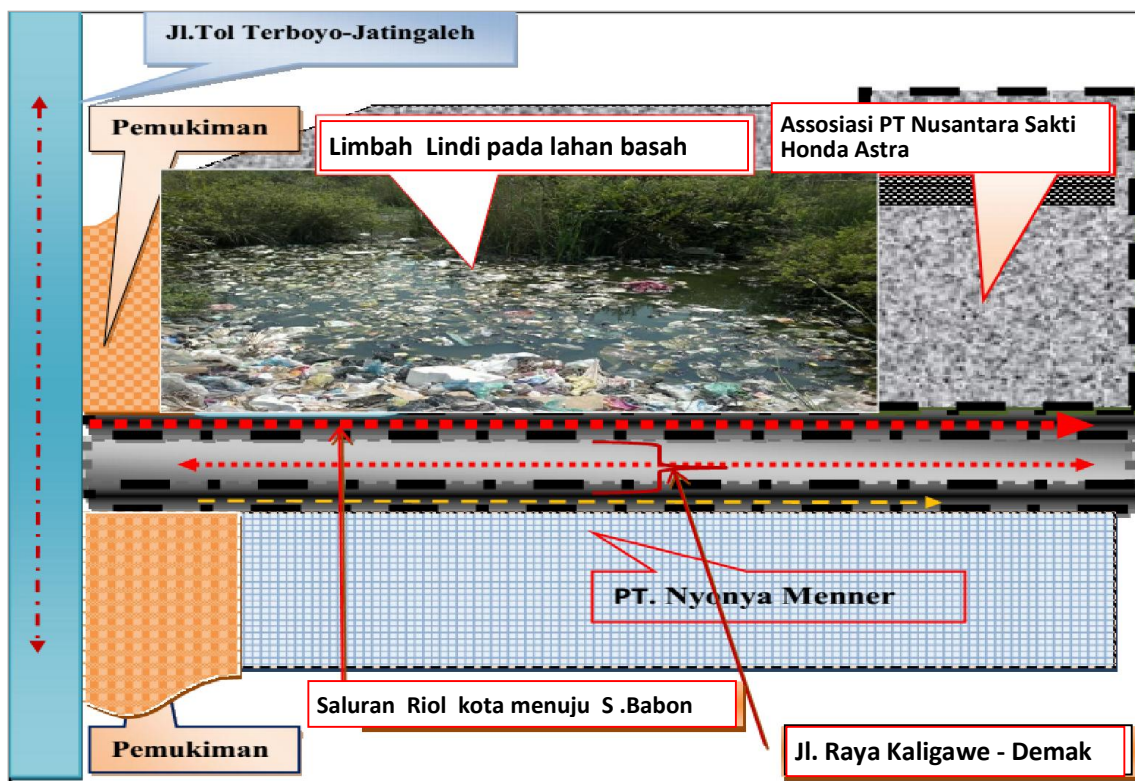
A. Ruang Lingkup

1. Lingkup Penelitian

- a. Penelitian eksperimen dengan sumber data primer hasil pengumpulan langsung dari sumber pertama selama penelitian, dan data sekunder yang bersumber dari referensi pendukung dan jurnal terkait.
- b. Penelitian eksperimental skala laboratorium, yang dilakukan dengan membuat rancangan acak teracak terpisah (*split plot design*).
- c. Proses perancangan penelitian ini menggunakan rekayasa CWs menggunakan *Sub Flow System* (SFS). Dasar perancangan CWs menggunakan besarnya kandungan BOD *influent* yang masuk ke sistem dan *effluent* primer dari CWs. Waktu tinggal hidraulik (HDT) dan waktu retensi di dalam sistem CWs disesuaikan dengan perhitungan kandungan BOD yang dikondisikan sebagai variabel tunggal (Metcalf *and* Eddy, 1993).
- d. Penelitian dilakukan secara *eksitu* di *Green House* (GH) dengan pertimbangan keamanan lokasi, sumber air, dan energi listrik yang tersedia.
- e. Air limbah yang digunakan di dalam penelitian ini dipasok dari lahan basah yang tercemar dari Tempat Pembuangan Sampah (TPS) di Kecamatan Terboyo kota Semarang.
- f. Peta lokasi penelitian, lokasi lahan basah tercemar dan tata letaknya disajikan pada Gambar 8 dan 9.



Gambar 8: Peta Lokasi Lahan Basah Tercemar dan Lokasi *Green House* (GH)



Gambar 8a: Letak Lokasi Lahan Basah Tercemar Lindi di Kecamatan Terboyo

2. Alasan Memilih Lokasi Penelitian

- a. Lokasi penelitian merupakan suatu kawasan lahan basah dan TPS yang limpasan limbah lindinya mencemari lahan basah tersebut. TPS ini dikelilingi oleh dominan tanaman *T. angustifolia* L. Tanaman tersebut dapat **hidup di rawa, lumpur, serta memungkinkan dapat mengakumulasi dan menurunkan kandungan limbah lindi**. Tanaman ini mampu tumbuh dan berkembang dengan kepadatan cukup tinggi pada lahan tercemar dengan kandungan bahan pencemar lindi cukup tinggi. Dimungkinkan *T.angustifolia* L toleran dengan tingkat pencemaran limpasan limbah lindi.
- b. Mudah dijangkau dari pusat kota dan biaya operasional transportasinya relatif rendah.
- c. Akses menuju ke kampus lancar dan memudahkan cara pengiriman sampel air limbah lindi pada waktu penelitian pendahuluan dan hasil penelitian utama.

3. Alat, Bahan dan Rekayasa CWs

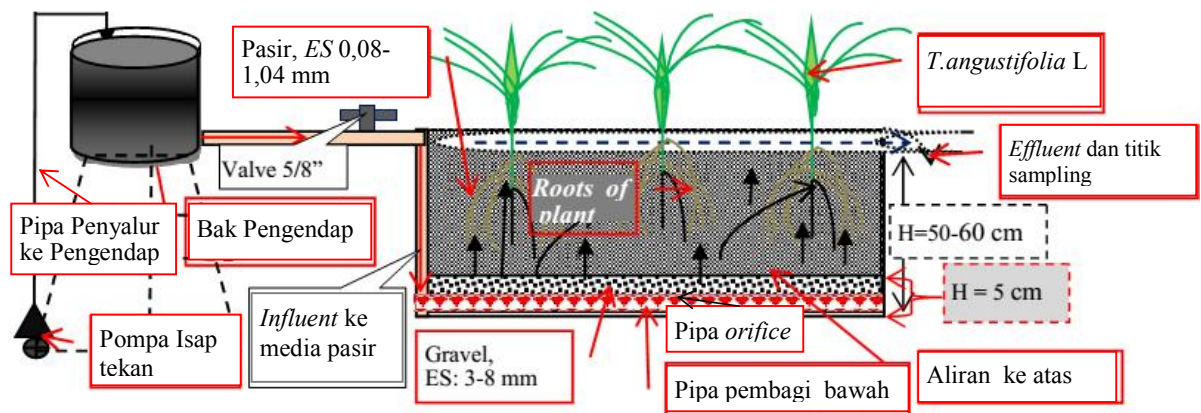
a. Alat

Perlitan yang diperlukan untuk penelitian ini terdiri atas: reaktor volume $0,08 \text{ m}^3$ sebanyak 48 unit; bak pengendap/*sedimentasi* dengan volume total $0,5 \text{ m}^3$; 10 unit bak penampung lindi dengan volume total $3,5 \text{ m}^3$; 1 unit *submersible pump* kapasitas 30 liter/Jam; 1 unit thermometer ruang dan 1 unit alat ukur temperatur; 3 unit alat *screen* media pasir; cangkul dan skop; *gate valve* PVC diameter $5/8 \text{ inchi}$ sebanyak 48 set; *knie* PVC $0,5 \text{ inchi}$ sebanyak 48 set; Sok *Tee* $0,5 \text{ inchi}$ 48 set; pipa PVC $0,5 \text{ inchi}$ 6 batang; pipa PVC $5/8 \text{ inchi}$ 4 batang; alat ukur debit air (*flowmeter*) 1 unit; gelas ukur 100 mL; kotak sampel dan botol sampel air limbah ; gergaji besi; slang plastik diameter $5/8 \text{ inchi}$ panjang 40 m, waterpas, dan GPS.

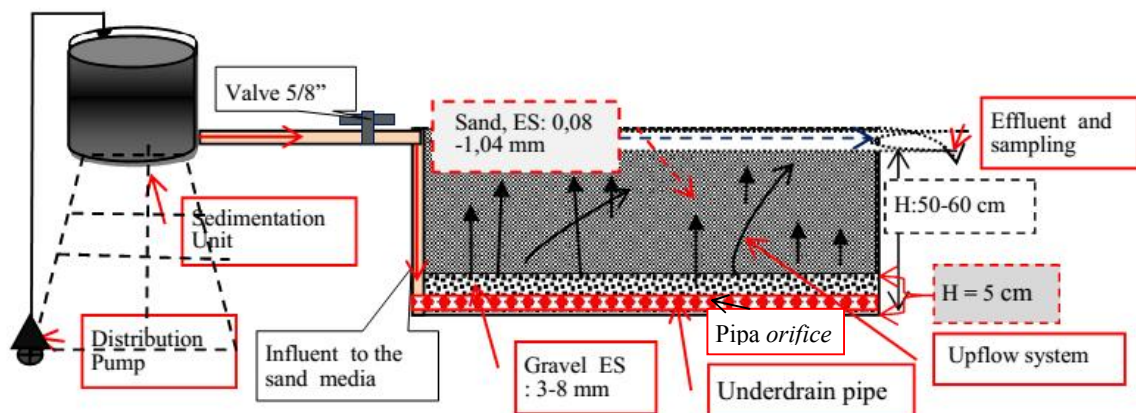
b. Bahan

Beberapa bahan yang digunakan dalam penelitian adalah: pasir sungai yang kering volume total 4 m³ ; isolatif pipa, lem PVC; media tanah bebas logam berat Pb dan Cu; *rizhoma* tanaman *T.angustifolia* L; air PDAM dan limbah lindi total 12,50 m³; media pasir halus diameter ES 0,08—1,104 mm sebanyak 3,016 m³ dan gravel ES 3—8 mm sebanyak 0,272 m³.

c. Gambar Rekayasa CWs dan Kontrol



Gambar 9: CWs Perlakuan di *Greenhouse* Peternakan Undip Semarang



Gambar 9a: CWs Kontrol di *Greenhouse* Peternakan Undip Semarang

B. Desain Penelitian

Rancangan penelitian ini menggunakan pendekatan *descriptive* dan *intervension studies*. Pendekatan *descriptive* digunakan untuk menggambarkan spesies tanaman yang dominan di lokasi pembuangan sampah pada lahan tersebut, umur lindi, luas, dan kondisi eksisting lokasi penelitian. Pendekatan *intervension studies* digunakan untuk menganalisis kinerja CWs terhadap penurunan kandungan bahan pencemar limbah lindi, pengaruh ketebalan media pasir, dan pengaruh densitas tanaman *T.angustifolia* L. Menurut Nazir (2005), penelitian eksperimen adalah observasi di bawah kondisi buatan (*artificial condition*) di mana kondisi dibuat dan diatur oleh peneliti. Penelitian ini merupakan *eksperimental* yang dilakukan dengan mengadakan perlakuan terhadap subjek penelitian serta adanya kontrol.

1. Rancangan Pengelompokan

Desain penelitian ini menggunakan rancangan petak terbagi (*split plot design*) berbasis kelompok teracak (*Randomized Blok Design with Split Plot Analysis*). Dasar pemilihan rancangan intervensi ini digunakan adalah (1) pemilihan level intervensi untuk mendapatkan gambaran kecenderungan (*trend*) atau respon hasil penurunan kandungan limbah lindi, (2) pengaturan faktorial jika digunakan dua atau lebih variabel yang akan diselidiki, (3) terdapat penggunaan perlakuan atau kontrol. Dalam suatu *intervensi* besarnya variabilitas (*error intervensi*) digunakan sebagai ukuran ketelitian dan dasar perbandingan hasil-hasilnya (Srigandono, 1981).

Terdapat dua hal yang menyebabkan timbulnya *error* dalam perlakuan yaitu adanya variabilitas yang terdapat pada bahan-bahan perlakuan dan tidak adanya keseragaman (*uniformity*) dalam pelaksanaan secara fisik dari perlakuannya. Suatu perlakuan dapat berjalan

secara efektif, perlu dirancang dengan menggunakan tiga kriteria yaitu *replication*, *randomization*, dan *local control*. Replikasi digunakan untuk menghitung besarnya *error* perlakuan dan mempertinggi ketelitian. *Error* suatu perlakuan timbul karena adanya perbedaan yang terdapat antara plot-plot perlakuan yang keadaannya sama atau diperlakukan sama. *Randomization* diperlukan untuk mendapatkan hasil yang dapat dipercaya. Oleh karena itu, letak setiap perlakuan dalam plot perlu secara random. Sedangkan *local control* dipergunakan untuk mempertinggi efisiensi suatu intervensi dan besarnya *error*. Semakin kecil *error* suatu perlakuan, maka semakin tinggi efisiensi perlakuannya, karena dapat membedakan adanya perbedaan-perbedaan yang kecil di antara hasil-hasilnya (Srigandono, 1981; Gomes, 1972).

Desain penelitian ini merupakan dua faktor atau lebih yang berlainan dan diselidiki secara bersamaan. Dua faktor tersebut masing-masing telah diuji dalam semua kombinasi. Faktor yang lebih dipentingkan akan diselidiki karena dianggap memiliki efek lebih besar dari faktor lainnya, sehingga perlakuan yang dihasilkan merupakan *split plot design*. Dalam rancangan tersebut menggunakan waktu beberapa kali pengamatan dan berurutan (*split plot in time*).

Variabel *dependen* yang diselidiki adalah *effluent* hasil proses penurunan kandungan limbah lindi meliputi TDS, BOD, COD, dan Pb. Variabel *independen* meliputi dua faktor atau lebih yaitu densitas tanaman *T.angustifolia* L, serta ketebalan media pasir dan *split plot in time*. *Presiasi* lebih dipentingkan untuk ketebalan media pasir.

Petak utama (*mainplot*) adalah kepadatan tanaman yang meliputi 4 level. Pertama, 0 tanaman/0,112 m² sebagai A₀. Kedua, 1 tanaman/0,112 m² sebagai A₁. Ketiga, 3 tanaman/0,112 m² sebagai A₂. Keempat, 5 tanaman/0,112 m² sebagai A₃. *Subplot* adalah ketebalan media pasir dengan 3 level, yaitu ketebalan media pasir 50 cm sebagai B₁, ketebalan media pasir 55 cm

sebagai B₂, dan ketebalan media pasir 60 cm sebagai B₃. Pengukuran menggunakan *split plot in time* sesuai dengan waktu tinggal berturut-turut; 7, 9, 11, dan 13 hari.

2. Dasar Pemilihan Tanaman *T.angustifolia* L

Tanaman *T.angustifolia* L merupakan spesies tanaman yang umumnya tumbuh di daerah air dan becek. Jarchow and Cook, (2009) mengatakan *T.angustifolia* L merupakan tanaman eksotis invasif di Amerika Utara yang sering membentuk monokultur di lahan basah dan lebih invasif dibandingkan anggota asli dari genusnya. *T.angustifolia* L merupakan salah satu spesies tanaman *emergen* yang digunakan pada lahan basah buatan seperti rawa-rawa, kolam, pinggiran saluran, bahkan di daerah yang airnya payau.

T.angustifolia L merupakan salah satu alternatif tanaman yang digunakan sebagai akumulator bahan pencemar dari limbah lindi. Hal ini dikarenakan beberapa alasan. Pertama, *T.angustifolia* L dapat menghasilkan biomassa 4 kali lebih banyak dan menyerap unsur polutan 2—27 kali lebih besar dalam lahan basah dibandingkan dengan kondisi lahan kering. Kedua, Jingtao *et al.* (2011) telah merekomendasikan tanaman *T.angustifolia* dapat tumbuh secara normal dengan kandungan COD kurang dari 400 mg/L, sedangkan pada COD di atas 600—800 mg/L tanaman *T.angustifolia* berubah menurun tingkat pertumbuhannya.

Kissoon *et al.* (2011) yang telah mengkaji beberapa elemen yang terakumulasi di bawah dekat akar mengatakan bahwa secara signifikan lebih besar pada tanaman tumbuh di bawah lahan basah dibandingkan dengan lahan kering.

3. Pertimbangan Pemilihan Variabel Penelitian

a. Kepadatan (*Density*) Tanaman

Kepadatan (*density*) tanaman berkorelasi dengan area tumbuhnya tanaman yang ditempati berkait dengan tersedianya unsur hara, air, dan sinar (cahaya). Jika *density* tanaman terlalu jarang/sedikit, maka kurang efisien. Bila kepadatan terlalu rapat, maka akan terjadi persaingan terlalu besar dalam penggunaan lahan, sehingga menyebabkan produktivitas menjadi rendah. *Density* populasi tanaman dapat ditingkatkan sampai pada ketersediaan daya dukung lingkungan. Karena keterbatasan lingkungan pada akhirnya akan menjadi pembatas pertumbuhan tanaman (Odum, 1959; dan Boughey, 1968). Untuk menekan adanya kompetisi antartanaman perlu pengaturan *density* populasi tanaman, terutama pada tanaman budidaya. *Density* populasi tanaman yang optimum ditentukan oleh tingkat kesuburan tanah dan tersedianya air yang cukup (Andrews and Newman, 1970). Pengukuran kerapatan (*density*) tanaman dapat dilakukan dengan formula yang ditawarkan oleh Michael (1984) .

$$\text{Kerapatan (density)} = \left[\frac{\text{jumlah populasi spesies tanaman}}{\text{luas seluruh petak contoh}} \right]$$

b. Ketebalan Media Pasir

Ketebalan media pasir merupakan faktor penentu dalam penyerapan secara fisik-kimia bahan-bahan organik di dalam limbah. Menurut Elbana *et al.* (2012), media filter pasir merupakan salah satu filter yang paling umum digunakan dalam mikro-sistem irigasi, terutama untuk penyaringan air dengan jumlah besar dengan kontaminan bahan organik seperti limbah yang direklamasi dan telah mengalami kemajuan terutama di dalam sistem pengolahan air limbah (*wastewater treatment*). Kietlinska and Renman (2005) mengkaji ukuran media pasir

σ *standard error* tiap satuan δ Perbedaan yang ingin ditentukan

t_l nilai nyata pada tabel t

Menurut Srigandono (1981), untuk rancangan acak kelompok (RAK) terdapat 4 syarat diperlukan, yaitu: (1) selisih yang ingin di deteksi besarnya tidak melebihi 20 % dari nilai tengahnya, (2) *error* baku yang diperoleh berdasarkan pengalaman percobaan sebesar 11—12 % dari nilai tengahnya, (3) peluang untuk memperoleh hasil yang nyata ditetapkan sebesar 80 %, dan (4) pengujian dilakukan pada tingkat 10 % atau 0,1.

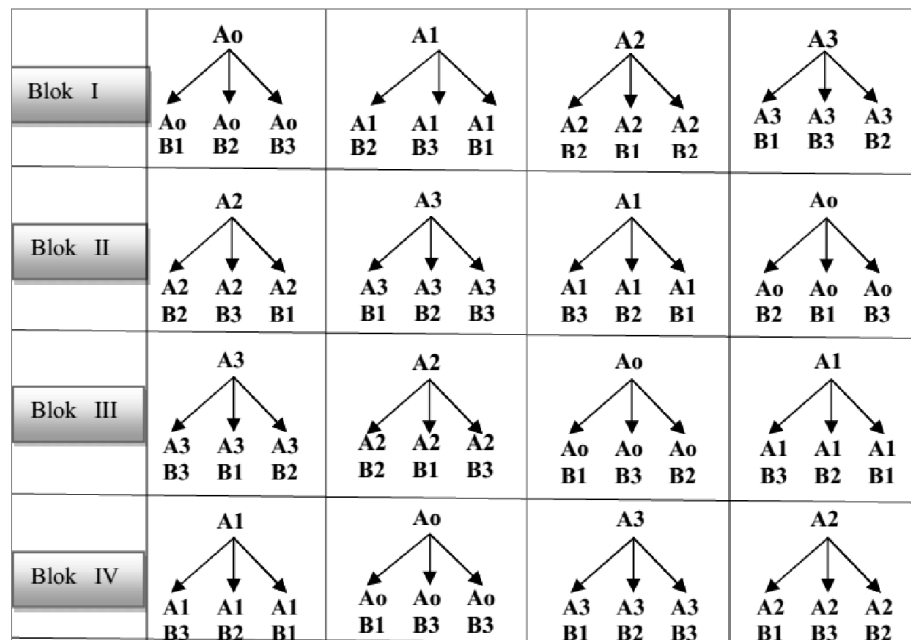
Mengacu pada persamaan (4.14) dengan menggunakan derajat bebas *error* (DBE), maka ditetapkan 30 kemudian dengan melihat pada nilai-nilai tabel t (Steel and Torrie, 1993), sehingga diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$t_l(30, 10\%) = 1,697 \text{ dan } t_2(30, 40\%) \text{ adalah } 0,854, \text{ di mana } 2(1-0,80) = 0,4$$

σ *standart error* ditetapkan 11 %, sehingga dimasukan ke dalam persamaan (4.14)

$$r \geq 2\left(\frac{11}{20}\right)^2(1,697 + 0,854)^2. \longrightarrow r \geq 3,93. \text{ Dibulatkan menjadi } 4.$$

Replikasi percobaan menggunakan 4 kali, DBE yang diperoleh $(p-1)(n-1) = 4 \times 3 = 12$, dimasukan ke dalam persamaan (4.14): $r \geq 2\left(\frac{11}{20}\right)^2(1,782 + 0,873)^2 \dots \dots r \geq 4,065$. Dengan menggunakan derajat bebas 11 % dari *replikasi* 4 kali persyaratan di atas telah terpenuhi. Kombinasi perlakuan 12 variasi, *replikasi* 4 kali diperoleh 48 unit percobaan. Perlakuan dan *replikasi* penelitian ini disajikan pada tata letak *split plot design* seperti pada Gambar 10.



Gambar 10: Tata Letak *Split Plot Design* pada CWs Skala Laboratorium

Keterangan Gambar 10:

A₀: Kepadatan 0 tanaman/0,112 m²

B₁: Ketebalan media pasir 50 cm,

A₁: Kepadatan 1 tanaman/0,112 m²

B₂: Ketebalan media pasir 55 cm,

A₂: kepadatan 3 tanaman/0,112 m²

B₃: Ketebalan media pasir 60 cm,

A₃; kepadatan 5 tanaman/0,112 m²

A₀: Sebagai kontrol

Sumber: Hasil *Split Plot Design* skala Laboratorium

Gambar hasil tata letak lahan basah perlakuan CWs dan kontrol di *Greenhouse* Fakultas Peternakan dan Pertanian Undip Semarang disajikan pada Lampiran 10.

1. Tahapan Penelitian

a. Skala Laboratorium

- 1). Uji pertumbuhan menggunakan *polybag*, pada uji pertumbuhan tanaman di *Green House*.
- 2). Tes ayak media pasir untuk menentukan ukuran keseragaman (*UC*) dan ukuran efektif (*ES*) di Laboratorium Material Teknik Sipil Undip.
- 3). Uji karakteristik untuk menentukan bahan kandungan pencemar lindi meliputi parameter TDS, BOD, dan COD di Laboratorium Jurusan Perikanan FIK Undip.
- 4). Uji kandungan logam berat Pb dilakukan pada Laboratorium Kimia BPPLI Semarang.
- 5). Analisis unsur hara dari tanah asal dan media pasir sungai sebagai media pasir.
- 6). Analisis kepadatan (*density*) dan daya serap (*porosity*) media pasir sungai dilaksanakan pada Laboratorium Material Teknik Sipil Undip.

b. Skala Kecil (*Pilot Scale*)

- 1). Plot petak lokasi untuk rekayasa lahan basah buatan (CWs) dilakukan di *Green House*.
- 2). Uji kelayakan sistem *under drain* dan arah aliran ke atas (*up flow*) pada masing-masing dilakukan menggunakan *split plot in time* berdasarkan petakan CWs.
- 3). Pelaksanaan penelitian, observasi terintegrasi pada CWs dilaksanakan dengan cara *eksitu* pada *Green House* Fakultas Peternakan dan Pertanian Undip Semarang.

c. Aklimatisasi

Sebelum tanaman digunakan untuk penelitian sesungguhnya pada sistem CWs secara menyeluruh, terlebih dahulu dipersiapkan dengan uji *kultivasi* di kebun percobaan selama tiga bulan berturut-turut dan dicatat umur serta tinggi tanaman setiap minggu sekali. *T. angustifolia* L muda umur ± 3 bulan dipindahkan secara vegetatif dari media *kultivasi* ke media pasir

secara seri. Langkah selanjutnya, uji *aklimatisasi* pada media pasir di CWs selama 2 minggu. Dilanjutkan dengan *aklimatisasi* menggunakan limbah lindi selama 2—3 minggu secara berturut-turut. *Aklimatisasi* tanaman tersebut sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Wild *et al.* (2001). Wild *et al.* (2001) menyatakan bahwa untuk keperluan *aklimatisasi* tanaman pada CWs, *T.angustifolia* L dan *T.latifolia* L perlu *dikultivasi* menggunakan limbah yang telah mengalami *furifikasi* di kawasan Jerman Selatan. Selanjutnya, Ya-Li *et al.* (2014) mengatakan setiap tanaman *T.angustifolia* L yang akan digunakan untuk pengolahan limbah berkadar tinggi perlu dipersiapkan (*pretreatment*) dengan larutan nutrisi di dalam media pasir *kultivasi*.

d. Penentuan Densitas Media Pasir

Densitas butiran media pasir ditentukan dengan menggunakan formula dari Consolmagno *et al.* (2008) mengikuti persamaan densitas butiran (ρ_B) pada persamaan (4.15).

$$\rho_B = \frac{(\text{total massa cup + butiran}) - (\text{massa cup})}{\text{Volume butiran}} \dots\dots\dots (4.15).$$

1). Tes Fisik Media Pasir

Tes kelayakan fisik media pasir bertujuan untuk mengkaji ketahanan fisik media berasal dari pasir sungai terhadap kondisi pH di bawah 6, sehingga media tersebut tidak mudah larut/tergerus apabila sudah tercampur dengan limbah lindi. Berat awal di dalam tes ini 200 gram, setelah direndam dalam larutan Asam Nitrat (HNO_3) dengan pH sebesar 5 selama 1 x 24 jam, dan kemudian di oven selama 1 x 24 jam. Pengukuran dilakukan penimbangan ketahanan fisik media pasir kali adalah berupa persentase (%) pengurangan berat awal dan akhir dari media pasir yang tidak lebih besar dari 2 % dari berat awal sesuai persyaratan perencanaan media pasir, ASTM (2010).

2). Analisis *Gradasi* Media Pasir

Tujuan analisis ini untuk memperoleh sebaran ukuran butir pada media pasir yang tersedia perlu dilakukan analisis ayakan (*Sieve Test Analysis*), sehingga susunan diameter butiran yang tersusun mendekati ukuran *stock* media berbutir yang tersedia. Hasil analisis ayakan kemudian di plot pada kertas logaritmik antara berat kumulatif dengan ukuran pemisahan untuk mencari ukuran diameter butiran efektif. Praktiknya banyak dikenal ukuran efektif (*ES*) dan koefisien keseragaman (*UC*). *ES* merupakan butiran yang mempunyai berat kumulatif 10 % dari seluruh berat atau P_{10} , sedangkan *Uniformity Coefficient* adalah angka keseragaman media filter yang dinyatakan dengan perbandingan antara ukuran diameter pada 60 % fraksi berat terhadap ukuran efektif, $UC = P_{60}/P_{10}$ sesuai dengan (Lienard *et al.*, 2001).

e. Pengukuran Debit *Influent* dan *Effluent* pada *Aklimatisasi* CWs

Sistem penyaluran limbah lindi yang terjadi pada CWs pada *Green House* dikondisikan sesuai perencanaan sistem aliran ke atas (*upflow*). Debit total limbah lindi sebesar 0,1 m³/hari atau 0,116x10⁻⁴ L/dt. Luas permukaan total 4,04 m² atau 0,112 m² setiap reaktor CWs. Ketebalan media pasir variatif antara 50 cm, 55 cm, dan 60 cm, serta tinggi total reaktor CWs antara 65—70 Cm. Limbah lindi sebelum dialirkan menuju CWs, terlebih dahulu dikondisikan pada unit pengendap (*sedimentasi unit*) volume total 500 liter.

Sistem penyaluran limbah dari unit *sedimentasi* menuju tiap blok CWs menggunakan pipa PVC berdiameter berturut-turut 0,5 inchi dan 5/8 inci. Setiap *influent* dari CWs di pasang pengatur debit (*gate valve*) yang berfungsi sebagai pengatur aliran limbah lindi yang mengalir ke setiap blok dan reaktor. Plot antara CWs yang satu dengan CWs lainnya disusun secara seri dan terletak pada bidang mendatar (*slope* 0°) serta dihubungkan dengan pipa *effluent* dari unit *sedimentasi*. Pipa *influent* setiap CWs terletak di bagian bawah reaktor, sedangkan pipa *effluent*

terletak ± 5 cm dari bagian atas reaktor. Pipa *under drain* berupa *lateral pipe* berlubang berdiameter masing-masing 1,5 mm dan di kelilingi *gravel* diameter 3—8 mm setinggi 5 cm, dan di atas *gravel* adalah media pasir halus *ES* 0,08—1,04 mm.

f. *Determinasi* Tanaman *T.angustifolia* L

Analisis *determinasi* tanaman *T.angustifolia* L dilaksanakan pada laboratorium Ekofisiologi Tanaman di Jurusan Biologi Fakultas MIPA Undip Semarang.

2. Populasi dan Sampel

a. Populasi

Populasi di dalam penelitian ini adalah semua limpasan limbah lindi dari TPS Terboyo Genuk Kota Semarang.

b. Sampel

Sampel *influent* dan *effluent* pada lahan basah buatan (CWs) dan kelompok kontrol yang di sampling berdasarkan waktu tinggal perancangan (HDT) atau *split plot in time* pada *effluent* CWs.

D. Kriteria Inklusi dan Eksklusi

1. Kriteria Inklusi

- a. Sampel dipasok dari limpasan limbah lindi TPS yang dominan dikelilingi oleh tanaman *T. angustifolia* L.
- b. Sampel untuk menentukan TDS, BOD₅, COD, dan Pb pada *influent* dan *effluent* dari CWs dilaksanakan secara bertahap berdasarkan rancangan waktu tinggal (HDT), sejak aklimatisasi sampai dengan *running* di CWs sistem *upflow*.

- c. Analisis TDS, BOD, BOD dan Pb di laboratorium masing-masing sampel dilakukan secara duplo.
- d. Pengamatan dan pencatatan pada CWs sistem *upflow* berdasarkan waktu tinggal (HDT) limbah lindi dengan pengamatan berbeda dan berulang (*split plot in time*), berturut-turut: 7, 9, 11 dan 13 hari.
- e. Sampel untuk menentukan *bioakumulasi* logam berat Pb di ambil secara acak di bagian media pasir, *influent*, *effluent* setiap blok di bagian akar dan daun tanaman *T.angustifolia* L.
- f. Penentuan jumlah logam berat Pb dilakukan dengan memanen tanaman *T. angustifolia* L perlakuan, kemudian dilakukan pengukuran biomasa tanaman basah dan kering.
- g. Jenis media pasir yang digunakan berasal dari pasir sungai dan tahan terhadap kondisi pH di bawah 6, dan telah memenuhi kriteria uji ayak pasir P_{10} dan P_{60} untuk ukuran efektif (*ES*) 0,08—1,04 mm dan ukuran keseragaman (*UC*) sebesar 3,102.
- h. Kontrol dikondisikan sama dengan reaktor yang berukuran sama dengan lahan basah buatan (CWs) tanpa ditanami *T. angustifolia* L.
- i. CWs dikondisikan secara *split plot design* pada petak terpisah pada beberapa reaktor berukuran diameter 0,38 m dan tinggi total 60—70 cm. Ketebalan media pasir masing-masing 50, 55, dan 60 cm.
- j. Pengaliran air lindi menuju ke CWs setiap plot perlakuan dan kontrol dilakukan seragam, dan berasal dari unit *sedimentasi* sama serta terletak di atas pada elevasi lebih tinggi 0,75 m.
- k. Sistem pengaliran limbah pada CWs menggunakan arah aliran ke atas (*upflow*) secara *bath reactor*.
- l. Besarnya debit pengaliran dan beban bahan pencemar limbah lindi pada CWs dan kontrol diperlakukan dengan rerata sama.

- m. Pertumbuhan tanaman *T. angustifolia* L yang di observasi diwakili oleh panjang daun, jumlah anak, dan umur tanaman yang dicatat setiap minggu (Salisbury and Ross, 1992) dan kepadatan tanaman pada masing-masing *reactor* yaitu: 0 tanaman/0,112 m², 1 tanaman/0,112 m², dan 3 tanaman/0,112 m², serta 5 tanaman/0,112 m².
- n. Kriteria kepadatan (*density*) tanaman dapat distandarisasi:
 - a). 0 tanaman/0,112 m² : sebagai kontrol
 - b). 1 tanaman/0,112 m²: kepadatan rendah
 - c). 3 tanaman/0,112 m² kepadatan sedang
 - b). 5 tanaman/0,112 m² kepadatan tinggi
- o. **Kriteria efisiensi penurunan terbagi atas 4 sebutan, yakni penurunan kurang dari 50 % di kategorikan efisiensi rendah, penurunan antara 50—75 % dikategorika efisiensi sedang, penurunan antara 76—84 % dikategorikan efisiensi tinggi, dan penurunan antara 85—100 % dikategorikan efisiensi sangat tinggi.**

2. Kriteria Eksklusi

- a. Tanaman yang mati pada saat pelaksanaan pertumbuhan awal dan uji *aklimatisasi*, perlu dilakukan pergantian tanaman.
- b. *Clogging* di bagian permukaan pada media pasir sehingga proses *filtering* tidak berjalan maksimal tidak akan diukur selama proses *running* sistem.
- c. *Evapotranspirasi* dan evaporasi tidak dilakukan pengamatan selama proses *running*
- d. Logam berat Cu dan kandungan fisik lindi (TSS) pada permulaan uji parameter yang tidak melebihi baku mutu lingkungan tidak dikaji di dalam penelitian.

E. Variabel Penelitian

1. Nama Variabel

Nama dan batasan variabel *independen* masing-masing *mainplot* dan *subplot*. Variabel *dependen* dan kontrol penelitian pada lahan basah buatan (CWs) akan diuraikan dalam bentuk matrik seperti yang terlihat pada Tabel 12.

Tabel 12: Variabel *Independen*, *Dependen* dan Kontrol

No	Variabel dan kode	Batasan Variabel
1	<i>Independen</i> (A dan B)	Lahan basah buatan sistem aliran ke atas (<i>upflow</i>) yang dialiri limbah lindi dengan 2 variabel meliputi: 1. <i>Mainplot</i> dengan empat level, sebagai variabel <i>independen</i> A. Ao: densitas 0 tanaman/0,112 m ² , A ₁ : densitas, 1 tanaman/0,112 m ² , A ₂ : densitas , 3 tanaman/0,112 m ² , A ₃ : densitas, 5 tanaman/0,112 m ² 2. <i>Subplot</i> dengan tiga level, sebagai <i>independen</i> B B ₁ : ketebalan media pasir 50 cm, B ₂ : ketebalan media pasir 55 cm, B ₃ : ketebalan media pasir 60 cm
2		Variabel <i>independent</i> untuk analisis uji beda dan korelasi kandungan logam Pb adalah: media pasir, akar dan daun <i>T.angustifolia</i> L.
3	<i>Dependen</i> (Y)	Hasil proses penurunan <i>effluent</i> pada CWs, meliputi parameter; TDS, BOD ₅ , COD, dan Pb.
4	Kontrol (A ₀ B ₁₋₃)	CWs menggunakan media pasir yang sama tanpa menggunakan tanaman <i>T.angustifolia</i> L.

2. Definisi Konseptual Variabel

- a. *T.angustifolia* L, salah satu tanaman yang hidup di rawa. Tanaman ini tumbuh di daerah yang berlumpur dan memiliki air yang cukup. Kepala bunga berbentuk seperti silinder memanjang,

- terdapat lonjakan kompak di ujung terminal dari batang 1—3 meter (Jarchow *and* Cook, 2009).
- b. Aliran ke atas (*upflow*), adalah arah aliran air limbah mengalir dari bawah ke atas (*upflow*) persatuan waktu, dan mengalami waktu tinggal per satuan luas-waktu di dalam media pasir (SNI 3981:2008).
 - c. Pengamatan dengan cara berurutan dan waktu yang berbeda-beda (*Split plot in time*) (Srigandono, 1981). *Split plot in time* ini dimulai dari 7, 9, 11, dan 13 hari sesuai dengan kriteria HDT perancangan pada CWs.
 - d. Pertumbuhan tanaman diamati setiap minggu sekali sejak ditanam di media tanah pada *polybag*. Pengamatan pertumbuhan diwakili tinggi daun, jumlah anak, dan umur tanaman (Salisbury *and* Wetze, 1992), sampai tanaman berumur 0—3 bulan.
 - e. Media adalah media pasir sungai yang telah mengalami pengujian; ukuran *UC* kurang dari 3,12, telah memenuhi kriteria *ES* dengan ayakan d_{10} 0,08—1,04 mm dengan *porositas* lebih dari 0,40; densitas butiran 0,893 gr/cm³; dan *permeabilitas* 2.073×10^{-3} cm/det (USEPA, 1980), serta tahan pada kondisi pH di bawah 6, dan tidak melebihi 2 %.
 - f. *Loading rate* 120—200 L/m² hari dengan kedalaman media pasir 0,50—0,60 meter untuk filter media tunggal (USEPA, 1980).
 - g. Kedalaman bak: tinggi total reaktor, tinggi air di atas media pasir, tebal pasir penyaring, tebal kerikil penahan dan *underdrain* (SNI 03-2414-1991).
 - h. Lahan basah buatan (CWs) adalah area media pasir dan ditanami dengan tanaman *T. angustifolia* L.
 - i. BOD adalah banyaknya oksigen yang dibutuhkan oleh mikroorganisme dalam lingkungan air untuk memecah (*mendegradasi*) bahan buangan organik yang ada dalam air menjadi karbondioksida dan air (Sawyer *and* McCarty, 1989).

- j. COD adalah jumlah oksigen yang diperlukan agar bahan buangan yang ada dalam air dapat teroksidasi melalui reaksi kimia baik yang dapat didegradasi secara biologis maupun yang sukar didegradasi (Alaerts dan Santika, 1984).
- k. Bioakumulasi logam Pb dilakukan dengan melakukan pengukuran berat basah, kering pada akar dan daun tanaman, jaringan tanaman *T.angustifolia* L, serta kandungan logam Pb yang tersisa di dalam media pasir. Selanjutnya, dihitung kandungan jumlah logam yang diakumulasi oleh akar dan daun tanaman, dan efisiensi penurunan (RE). Analisisnya menggunakan bioakumulasi (Arifin *et al.*, 2012; Madjid *et al.*, 2011).

$$\text{Bioakumulasi} = \frac{\text{konsentrasi logam berat pada jaringan tanaman (ppm)}}{\text{konsentrasi logam pada media (ppm)}} \dots\dots\dots 2.1)$$

- l. Efisiensi Penurunan (RE) adalah selisih antara jumlah TDS, BOD₅, COD, dan Pb yang masuk (*influent*) dikurangi dengan jumlah kandungan zat organik *effluent* dibagi jumlah zat organik *influent* dikalikan 100 persen (Birch *et al.*, 2004).

$$\% \text{ penurunan} = \left[\frac{C_0 - C_1}{C_0} \right] \times 100 \% \dots\dots\dots 2.2)$$

Keterangan: C₀ adalah kandungan TDS, BOD₅ dan COD *influent*, dan C₁ di *effluent*.

- m. Status ekologi tanaman *T.angustifolia* L dan perannya terhadap lingkungan dilakukan *determinasi* pada *ekofisiology* tanaman, dan melakukan diskusi dengan pihak di bidang pakar terkait, serta melakukan kajian melalui jurnal ilmiah terakreditasi terkait.

3. Definisi Operasional Variabel

Definisi operasional variabel penelitian disajikan dalam bentuk matriks pada Tabel 13.

Tabel 13: Definisi Operasional Variabel

No	Variabel	Cara pengukuran / Cara Pengumpulan Data	Skala Variabel	Satuan Variabel	Rentang Nilai Variabel
1	TDS	Diukur menggunakan SNI 06-6989.4-2004.	Rasio	mg/L	* ³⁾
2	BOD	Diukur menggunakan botol Winkler pada suhu 20°C selama 5 hari. Berdasarkan SNI 6989.72-2009.	Rasio	mg/L	Suhu 20 ⁰ C ± 1 ⁰ C, 5 hari ± 6 jam.* ¹⁾
3	COD	Diukur dengan alat spektrofotometri pada γ 400 atau γ 600 nm (ditentukan), dengan SNI 06-6989.2-2004 dengan refluks tertutup.	Rasio	mg/L	Konsentrasi COD < 90 diencerkan, pada λ :420 nm * ²⁾
4	Pb	Diukur menggunakan metode spektrofotometri ASS-nyala dengan γ 248,3 nm. SNI 06-6989.4-2004.	Rasio	mg/L	* ³⁾
5	Media pasir	Diuji dengan ukuran analisis ayak pasir tergradasi dengan ES, UC menggunakan SNI 3981:2008.	Rasio	mm -	ES:0,2 - 0,4 / UC:(2-3) * ⁴⁾
6	<i>Up flow</i>	Metode pengukuran pada saluran terbuka SNI 03-2414-1991.	Rasio	m ³ /hr	
7	td (waktu tinggal)	Diuji dengan pencatat waktu lamanya limbah lindi di dalam media pasir pada lahan basah sampai keluar mulai: 7, 9, 11 dan 13 hari	Rasio	m ³ /hr. mm ²	
8	Q (debit)	Jumlah air limbah (dalam satuan volume) yang mengalir persatu an waktu diukur dengan <i>flow meter</i>	Rasio	liter/hr	
9	Kepadatan tanaman	Jumlah populasi tanaman setiap minggu dan umur tanaman	Interval		
10	Efisiensi Penurunan	Beban bahan pencemar tertentu pada <i>influent</i> dikurangi <i>effluent</i> dibagi dengan beban <i>influent</i> bahan pencemar dikalikan 100 %.	Rasio	%	

Keterangan Tabel 13:

*¹⁾ sesuai dengan SNI 6989.72-2009; *²⁾ sesuai dengan SNI 06-6989.2-2004;

*³⁾ sesuai dengan SNI 06-6989.4-2004; *⁴⁾ sesuai dengan SNI 3981: 2008.

F. Teknik Pengumpulan Data

1. Data Sekunder

Data sekunder dikumpulkan melalui kajian pustaka yang berkaitan dengan penelitian ini, dari buku teks, buku kamus istilah, jurnal ilmiah terakreditasi nasional dan internasional, serta laporan studi kasus *final project* tentang lahan basah buatan.

2. Pengamatan (*Observasi*)

- a. Pengamatan dilaksanakan secara bertahap di kawasan TPS dan kawasan lahan basah yang tercemar limbah lindi sampah.
- b. Observasi ditujukan untuk menginventarisir kondisi eksisting limbah lindi TPS sampah yang dikelilingi oleh tanaman *T.angustifolia* L.
- c. Observasi di lapangan menggunakan *GPS* untuk rencana lokasi penelitian, arah mata angin dan tata letak (*layout*) lahan tercemar di lapangan.
- d. Pengamatan pada lahan basah buatan meliputi kondisi fisik dan kimia air limbah lindi yang dianalisis menggunakan alat *spectrofotometer* dan AAS.

3. Waktu Pengumpulan Data

- a. Pengumpulan data awal dimulai setelah ada masukan dari Ketua Program DIL, promotor, dan ko-promotor pada peneliti untuk melaksanakan survey di lahan basah di kecamatan Genuk kota Semarang.
- b. Pelaksanaan pengumpulan data pada penelitian lanjutan yang meliputi uji pertumbuhan tanaman, uji *aklimatisasi*, uji ayak media pasir dan uji sistem secara menyeluruh dapat dirinci sebagai berikut:

- 1). Pengukuran analisis awal karakteristik lindi dilaksanakan bulan Mei 2013.
- 2). Kultivasi dan Pengukuran pertumbuhan tanaman dimulai bulan Agustus—Oktober 2013.
- 3). Pengujian ayak media pasir untuk *ES* dan *UC* pada bulan September—Oktober 2013.
- 4). Perancangan CWs di *greenhouse* secara terintegrasi November 2013.
- 5). Pengukuran kelayakan sistem lahan perlakuan dan Kontrol bulan Desember 2013.
- 6). Pengukuran uji *aklimatisasi* bulan Maret 2014.
- 7). Sampling lindi untuk menetapkan *influent* dan *effluent* pada lahan basah buatan dilaksanakan berdasarkan waktu tinggal dari bulan Maret—Juni 2014.
- 8). Pengukuran bioakumulasi logam berat Pb dilaksanakan pada Juli—Agustus 2014.

G. Pengolahan dan Analisis Data

1. Pengolahan Data

Pengolahan data menggunakan sistem komputerisasi dan program lain yang relevan.

- a. Data elevasi dan posisi lintang subjek penelitian sebelum diolah, direkam dalam GPS, kemudian ditransfer ke dalam komputer berbentuk tulisan.
- b. Data sampel kandungan limbah lindi (TDS, BOD₅, COD, dan Pb) hasil analisis AAS direkam secara manual ditransfer ke dalam komputer bentuk tulisan dan tabel *excel*.
- c. Kondisi fisik CWs direkam menggunakan kamera digital di transfer ke dalam komputer secara komputerisasi.
- d. Pengolahan data menggunakan paket program *database* dan SPSS 18.0 dalam rancangan percobaan (*eksperimental design*) (Pramesti, 2013).

2. Analisis Data

Analisis data yang digunakan untuk menjawab tujuan penelitian menggunakan analisis variansi dengan model matematika persamaan (4.15), yang mencakup analisis untuk sumber variansi, derajat bebas, jumlah kuadrat, rerata kuadrat, dan signifikansi. Analisis data statistik yang digunakan dalam penelitian menggunakan Analisis Ragam (*analysis of variance*) menggunakan taraf kepercayaan pada level 95 % (Nazir, 2005).

a. Analisis Statistik Rancangan Kelompok Teracak

Model matematika *aditif linier* analisis ragam untuk rancangan kelompok teracak dengan dua faktor atau lebih (Steel and Torrie, 1993; Montgomery, 2001) disajikan dalam persamaan (4.15).

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \delta_k + (\tau\beta)_{ij} + (\beta\delta)_{jk} + (\tau\beta\delta)_{ijk} + \varepsilon_{ijk} \quad \left\{ \begin{array}{l} i = 1, \dots, a \\ j = 1, \dots, b \\ k = 1, \dots, c \\ l = 1, \dots, n \end{array} \right\} \dots\dots\dots 4.15)$$

Keterangan persamaan (4.15):

Y_{ijkl} : nilai pengamatan hasil penurunan kandungan (variabel *dependen* Y) yang mendapat faktor A tingkat ke- i , faktor B tingkat ke- j pada replikasi ke- l .

μ : rata-rata keseluruhan penurunan kandungan (variabel *dependen* Y).

τ_i : efek faktor A (*density* tanaman) tingkat ke- i dengan asumsi $\sum_{i=1}^a \tau_i = 0$,

β_j : efek faktor B (ketebalan media pasir) tingkat ke- j dengan asumsi $\sum_{j=1}^b \beta_j = 0$,

$(\tau\beta)_{ij}$: efek faktor A (*density* tanaman) ke- i dengan B (ketebalan media pasir) ke- j dengan asumsi $\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b (\tau\beta)_{ij} = 0$.

$(\tau\delta)_{ik}$: efek faktor A (*density* tanaman) ke- i dengan efek faktor C (*split plot in time*) ke- k dengan asumsi $\sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c (\tau\delta)_{ik} = 0$.

$(\beta\delta)_{jk}$: parameter yang menyatakan efek faktor B tingkat ke- j dengan efek faktor C tingkat ke- k , dengan asumsi $\sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c (\beta\delta)_{jk} = 0$.

$(\tau\beta\delta)_{ijk}$: Parameter yang menyatakan efek faktor A tingkat ke- i , dan faktor B tingkat ke- j , k , dengan asumsi $\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=0}^c (\tau\beta\delta)_{ijk} = 0$.

γ : koefisien regresi; dan X_{ijkl} : adalah konstanta.

ε_{ijk} : komponen sesatan yang diasumsikan berdistribusi normal.

\bar{X} : nilai rerata *density* tanaman yang diukur.

ε_{ijk} : komponen sesatan/galat yang timbul pada ulangan ke- j pada *density* ke- i yang diasumsikan berdistribusi normal identik *independen* disingkat NID $(0, \sigma^2)$.

Tabel 14: Penentuan Tabel Analisis Variansi

No	Sumber Variansi	Y	X	XY	dB
1	A (densitas tanaman)	JKA_Y	JKA_X	JKA_XY	a – 1
2	B (ketebalan Media Pasir)	JKB_Y	JKB_X	JKB_XY	b – 1
3	A*B	JKB_Y	JKB_X	JKAB_XY	(a-1)(b-1)
4	Sesatan (<i>error</i>)	JKS_Y	JKS_X	JKS_XY	ab (n-1)
5	Total	JKT_Y	JKT_X	JKT_XY	abn – 1

Sumber: Hasil Rujukan Pustaka (Pramesti, 2013).

1). Merumuskan Hipotesis

- a). Probabilitas $> 0,05$, maka hipotesis H_0 diterima, maka hipotesis H_1 ditolak, artinya varian variabel dependen bersifat homogen sehingga memenuhi syarat analisis kovariansi. Artinya analisis ini dapat dilanjutkan kepada uji signifikan pengaruh faktor A, dan B serta pengaruh interaksi faktor A dan B terhadap variabel Y.

- a) Jika probabilitas $< 0,05$ maka H_0 ditolak, maka H_1 diterima, sehingga varian dari variabel tidak sama (heterogen). Jika homogenitas belum terpenuhi, maka dilakukan transformasi data menggunakan logaritma dari variabel dependen (Y).
- b) *Test of between-subject effect* dilakukan untuk menguji pengaruh yang ditimbulkan oleh masing-masing variabel *independen* (sumber data). Kolom ke-1 menunjukkan apa yang akan diuji, kolom ke-2 merujuk kepada jumlah kuadrat (JK). Kolom ke-3 derajat kebebasan (df), kolom ke-4 merujuk pada rerata kuadrat (RK), kolom ke-5 menunjukkan F_{rasio} , dan kolom ke-6 merujuk ke signifikan test.

$$\text{Statistik uji : } F_{rasio} = \frac{RK_{P(adj)}}{RK_{S(adj)}}$$

DK = H_0 ditolak jika $F_{rasio} > F_{(\alpha, a-1, ab(n-1)-1)}$.

- c) Analisis Interaksi

$H_{0i} (\tau\beta)_{ij} = 0$, semua i, j untuk semua i dan j tidak ada interaksi antara τ_i dan β_j .

H_{ij} : tidak semua $(\tau\beta)_{ij} = 0$, untuk suatu i dan j terdapat interaksi antara τ_i dan β_j .

- d) Analisis ragam bantu (*analysis of covariance*) untuk *mainplot* dan *subplot* digunakan untuk menentukan:

- (1). Ada atau tidaknya pengaruh tunggal dari densitas tanaman *T.angustifolia* L dan ketebalan media pasir terhadap efisiensi penurunan TDS, BOD, COD limbah lindi pada lahan basah buatan (untuk menjawab hipotesis minor butir 1).
- (2). Terdapat atau tidaknya pengaruh interaksi densitas tanaman *T.angustifolia* L dan ketebalan media pasir terhadap penurunan TDS, BOD, COD limbah lindi (untuk menjawab dari hipotesis minor pada butir 2).
- (3). Pengujian untuk meningkatkan ketepatan pengaruh *interaksi* variabel X dan Y *mainplot* dan *subplot* pada *split plot design* menggunakan *galat* yang timbul pada ulangan ke- j pada *densitas* ke- i diasumsikan berdistribusi normal identik *independen* disingkat NID $(0, \sigma^2)$.

b. Analisis Perbandingan Antarvariabel *Independen* dengan *Dependen*

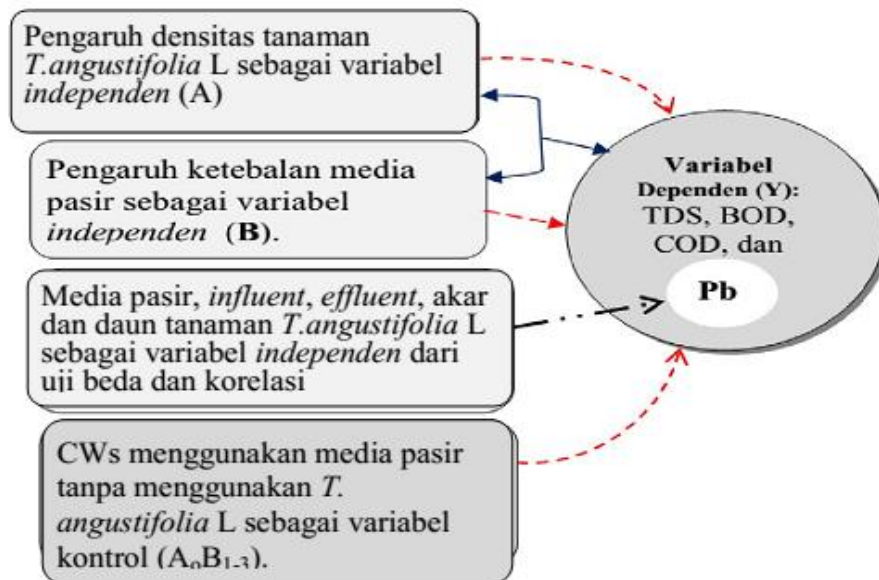
Maksud pengujian pada tahapan ini digunakan untuk menguji apakah ada perbedaan secara signifikan pada berbagai hasil pengukuran untuk sebuah variabel. Hal ini ditekankan adanya pengukuran yang berulang (*repeated measure*) dan berbeda, serta bertahap terhadap variabel *dependen*. Tahapan ini menggunakan uji perbandingan dengan cara berpasangan (*pairwise comparison*) yang diawali dengan *Mauchly Test of Sphericity* baik terhadap variabel *independen* maupun *dependen* (Santoso, 2014).

Hipotesis *Mauchly Test of Sphericity* yaitu H_0 berarti varian dari perbedaan di antara semua kombinasi dari level (*group*) yang diuji adalah tidak ada perbedaan, dan H_1 berarti varian dari perbedaan di antara semua kombinasi dari level (*group*) yang diuji adalah ada perbedaan. Kriteria pengujiannya, jika angka *probabilitas (signifikan)* di atas 0,05 maka H_0 diterima, dan jika angka *signifikan* di bawah 0,05 maka H_0 ditolak.

c. Prosedur Pemilihan Metode Statistik dan Cara Penyajian Data

Prosedur pemilihan metode uji statistik dan cara pengolahan data dari hasil analisis laboratorium secara ringkas diuraikan dalam bentuk diagram alir seperti pada Gambar 12.

Uji beda dan uji korelasi dengan Analisis variansi digunakan untuk mengkaji perbedaan, dan korelasi logam berat Pb pada media pasir, *influent*, *effluent*, akar dan daun tanaman *T. angustifolia* L (untuk menjawab hipotesis minor butir 3).



Gambar 11: Pengaruh Variabel A, B dan Pengaruh Interaksi antara A dan B terhadap Variabel Y, jika A dan B berubah.

Keterangan Gambar 11:

- - - - - ➔ Pengaruh dari A, dan B terhadap variabel *dependen* (Y)
- ↔ Pengaruh Interaksi antara A dan B terhadap variabel *dependen* (Y)
- . . - ➔ Uji beda dan korelasi *influent*, *effluent*, media pasir, akar dan daun *T.angustifolia* L terhadap variabel Y (Pb).

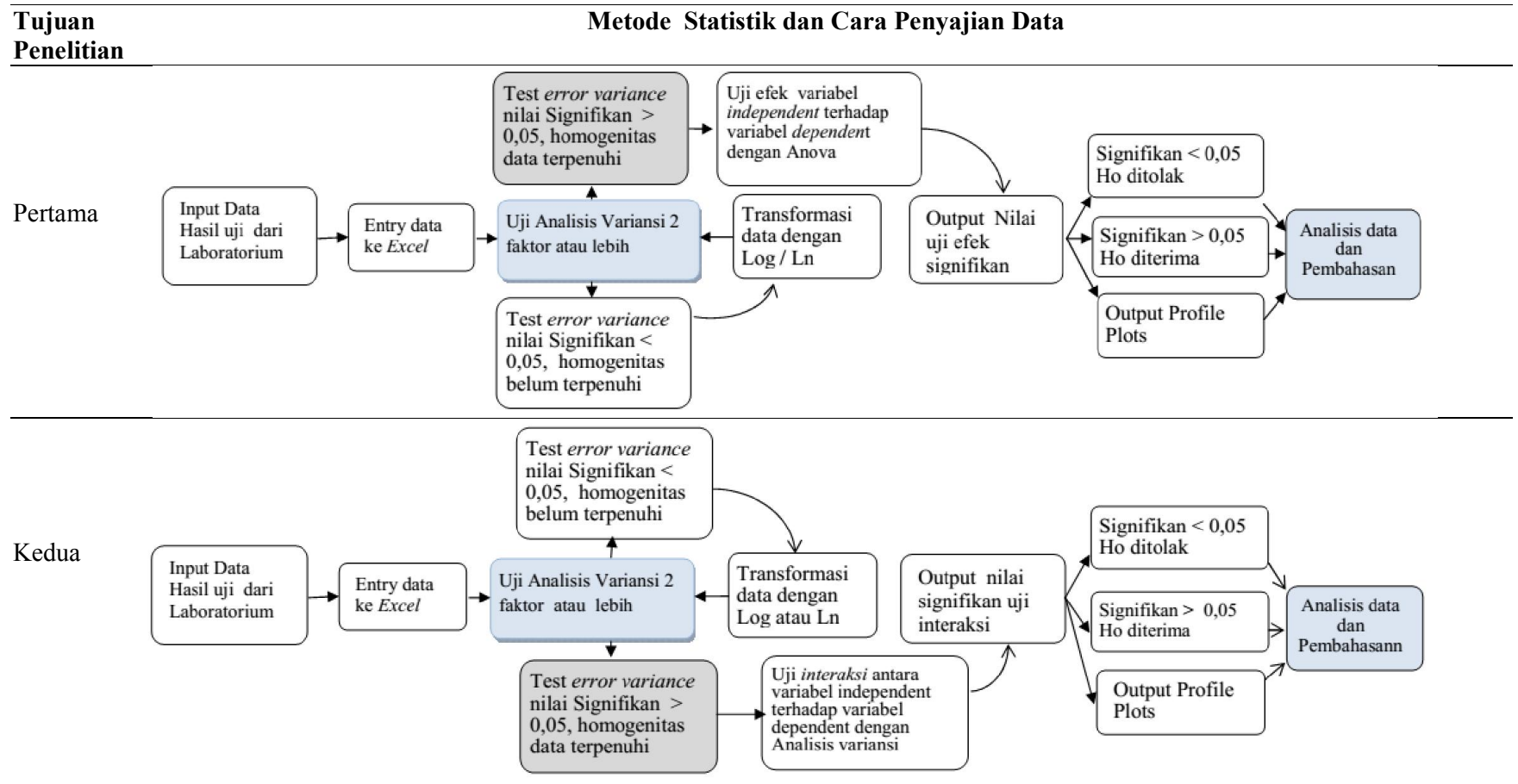
H. Tahapan Penelitian

1. Observasi lapangan untuk menentukan subjek penelitian dan melakukan sampling pendahuluan limpasan limbah lindi untuk mengidentifikasi karakteristik kandungan bahan pencemarannya.
2. Melakukan pemilihan jenis tanaman yang dominan dan identifikasi untuk menentukan *fisiologi* tanaman *T.angustifolia* L, serta melakukan studi pemilihan jenis media pasir

untuk menentukan ukuran efektif (*Effective Size*), ukuran keseragaman (*Uniformity Coefficient*), *densitas* dan *porositas* media, dan uji kekuatan fisik media pasir untuk menentukan ketahanan media pada kondisi pH di bawah 6.

3. Melakukan uji pertumbuhan tanaman pada *polybac* untuk mengkondisikan tanaman pada media tanah asli dan melakukan pencatatan umur tanaman setiap seminggu sekali.
4. Melakukan uji *aklimatisasi* untuk kesesuaian tanaman pada media pasir dan limbah lindi dengan kandungan tinggi.
5. Melakukan rekayasa sistem aliran vertikal ke atas (*upflow*) pada CWs.
6. Melakukan uji kelayakan kapasitas dan waktu tinggal air limbah, melakukan uji secara terintegrasi *influent* dan *effluent* pada CWs (a lur penelitian disajikan pada Gambar 13).

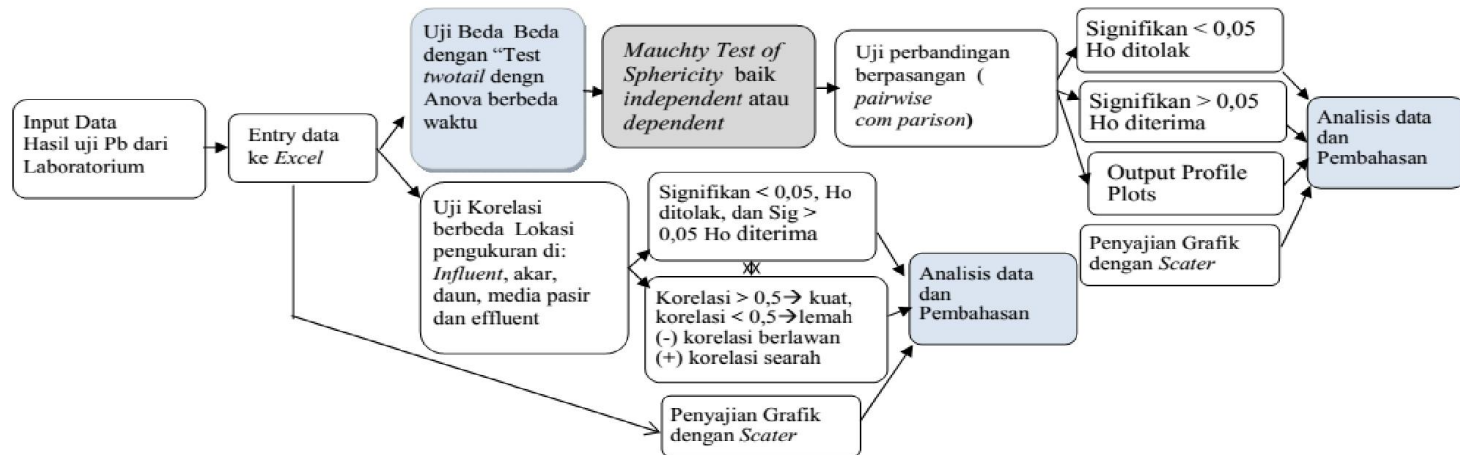
Gambar 12: Diagram Alir Pemilihan Metode Statistik dan Cara Penyajian Data



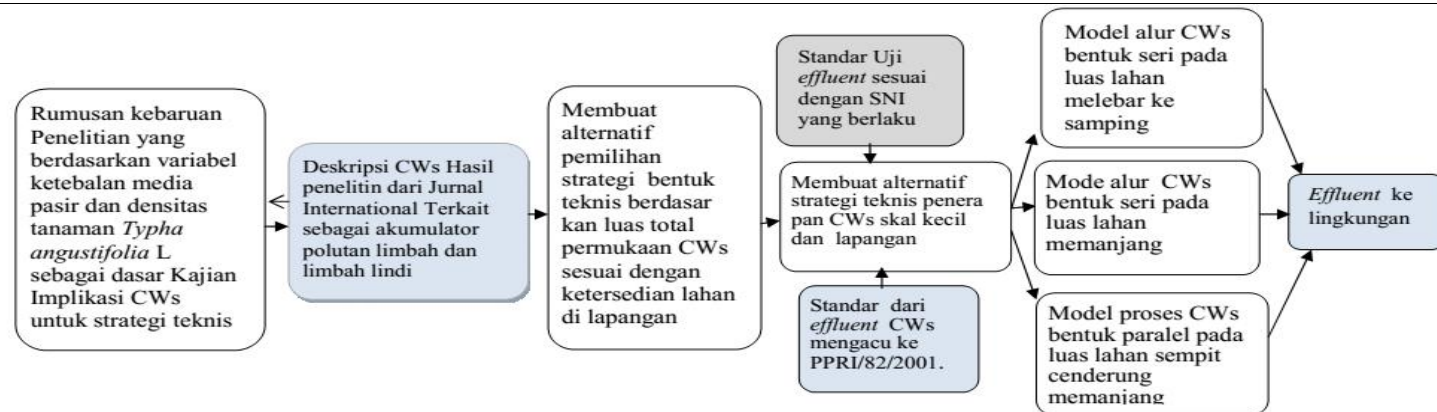
Tujuan Penelitian

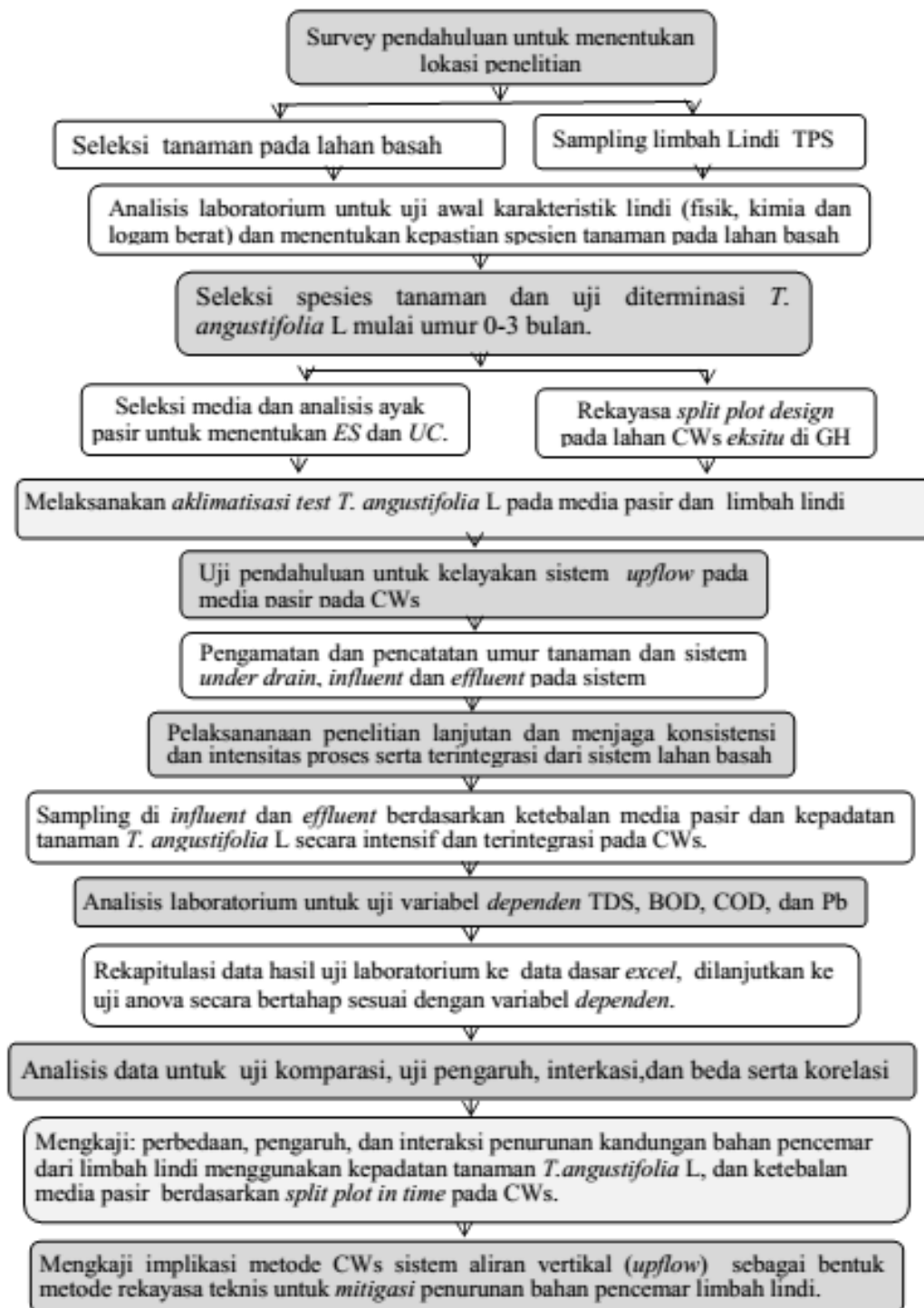
Metode Statistik dan Cara Penyajian Data

Ketiga



Keempat





Gambar 13: Alur Penelitian